

Bayerischer Forschungsverbund zur Lärmminderung von technischen Anlagen

# Abschlussbericht

Berichtszeitraum: 1.7.2010 – 31.8.2013

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Technische Universität München

September 2013

# Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Angaben			
	1.1.	Titel	1
	1.2.	Förderungszeitraum	1
	1.3.	Antragsteller	1
2.	Erge	bnisse und Nutzen des Forschungsverbundes FORLärm	3
	2.1.	Einleitung	3
	2.2.	Hervorhebenswerte Projekt-Ergebnisse	3
	2.3.	Gesamtbewertung	7
3.	Beri	chte der Teilprojekte	9
	A1.	Geräuschreduzierung der Lüftungsanlagen von Niedrigenergie- & Passivhäusern .	9
	A2.	Geräuschreduktion der Kühlungseinrichtungen von technischen Anlagen und Ge-	
		räten	18
	A3.	Aeroakustische Schallentstehung in Ventilatoren und deren Schallabstrahlung $\ . \ .$	26
	A4.	Berechnung aerodynamischer Schallquellen gekapselter Heckrotoren	34
	B1.	Klangqualitätsbezogene Übertragungspfadanalyse und -synthese	44
	B2.	Fahrgastzellenakustik - Sound Design für PKW-Innenraum	52
	B3.	Lärmreduktion bei elektrischen Leistungstransformatoren	60
Α.	Anha	ang	68
	A.1.	Promotionen	68
	A.2.	Wissenschaftliche Preise	68
	A.3.	Studentische Arbeiten	68

iv

## 1. Allgemeine Angaben

## 1.1. Titel

Bayerischer Forschungsverbund zur Lärmminderung von technischen Anlagen ("FORLärm") – Methoden und Verfahren zur Reduzierung des Lärms von Maschinen und Anlagen

Aktenzeichen: 890-09

### 1.2. Förderungszeitraum

1. Juli 2010 bis 31. Oktober 2013

### 1.3. Antragsteller

#### 1.3.1. Sprecher

#### Sprecher:

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Sensorik Paul-Gordan-Str. 3/5 91052 Erlangen

#### 1.3.2. Beteiligte Hochschulpartner

Prof. Dr.-Ing. Nikolaus A. Adams apl. Prof Dr.-Ing. Christian Breitsamter Technische Universität München Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik Boltzmannstr. 15 85748 Garching

Prof. Dr.-Ing. Hugo Fastl Technische Universität München Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation AG Technische Akustik Arcisstr. 21 80333 München

#### stellvertretender Sprecher:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren Müller-BBM GmbH Robert-Koch-Str. 11 82152 Planegg bei München

apl. Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schlücker Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik Bereich Fluidsystemtechnik und Strömungsakustik Cauerstr. 4 91058 Erlangen

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch Prof. Dr. techn. Manfred Kaltenbacher Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Sensorik Paul-Gordan-Str. 3/5 91052 Erlangen



#### 1.3.3. Beteiligte Industrieunternehmen

ANSYS Germany GmbH Staudenfeldweg 12 83624 Otterfing

CFDnetwork Engineering Bismarckstr. 2 80803 München

EUROCOPTER Deutschland GmbH Willy-Messerschmitt-Str. 85521 Ottobrunn

Müller-BBM Vibroakustik Systeme GmbH Robert-Koch-Str. 13 82152 Planegg bei München

Siemens AG Energy Sector Power Transmission Division Transformers E T TR TI Katzwanger Str. 150 90461 Nürnberg BMW Group Center of Innovation and R&D Knorrstr. 147 80788 München

ebm-papst Landshut GmbH Plattformentwicklung Hofmark-Aich-Str. 25 84030 Landshut

Gardner Denver Deutschland GmbH ED DV Industriestr. 26 97616 Bad Neustadt a. d. Saale

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG Mühldorfstr. 15 81671 München

Siemens AG Industry Sector Drive Technologies Division Large Drives I DT LD ID Vogelweiherstr. 1 - 15 90411 Nürnberg

## 2. Ergebnisse und Nutzen des Forschungsverbundes FORLärm

## 2.1. Einleitung

Vier Universitätsinstitute der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der Technischen Universität München haben sich mit 10 bayerischen Industrieunternehmen im Zeitraum 1. Juli 2010 bis 31. Oktober 2013 zu dem von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderten Forschungsverbund FORLärm zusammengeschlossen. Dabei wurde im Rahmen von 7 Teilprojekten das Problem der Lärmemission von technischen Geräten und Anlagen angegangen. Im Folgenden sollen nun zunächst die dabei erzielten Ergebnisse in Form von technischen Errungenschaften vorgestellt werden, bevor abschließend eine Gesamtbewertung des mit FORLärm erzielten Nutzens für Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft erfolgt.

## 2.2. Hervorhebenswerte Projekt-Ergebnisse

#### A1: Geräuschreduzierung der Lüftungsanlagen von Niedrigenergie-/Passivhäusern

- 1. Es hat sich gezeigt, dass sich eine schalltechnische Optimierung von Lüftungskanälen, rein auf der Basis von Finite-Elemente(FE)-Berechnungen, in der Praxis nicht sinnvoll durchführen lässt, da die Ausbreitung von Körperschallwellen in Lüftungskanälen sehr stark von den mechanischen Randbedingungen abhängt, welche in einem FE-Modell kaum realitätsnah abbildbar sind. Es wurde alternativ eine Hybrid-Methode entwickelt, welche FE-Akustik-Simulationen mit Messungen (Laser-Scanning-Vibrometer zur Messung der Oberflächen-Normalenschnelle an der Fluid-Struktur-Grenzfläche) als Eingangsdaten durchführt.
- 2. Es wurde ein auf Ultraschall basierendes Indoor-Positioning-System entwickelt, das in einfacher und in der Praxis leicht handhabbarer Weise die Kartierung von Schallfeldern erlaubt. Dieses System ist allgemein verwendbar und wurde bereits projektübergreifend getestet und gewinnbringend eingesetzt.
- 3. Das bereits im Zuge früherer Forschungsprojekte an den beteiligten FAU-Lehrstühlen konzipierte und implementierte numerische Verfahren zur Berechnung von strömungsinduzierten Schallquellen wurde für die Anwendung bei Lüftungskanälen erweitert und angewandt. Die Ergebnisse geben sowohl den Schalldruckpegel als auch das Frequenzverhalten gut wieder. Der Einfluss von Parameteränderungen kann sehr gut vorhergesagt werden. Dies wurde experimentell validiert.
- 4. Das in TP B2 entwickelte Mikrophon-Array konnte erfolgreich zur Ortung von Strömungsschallquellen in Lüftungsanlagen eingesetzt werden. Das Spektrum des akustischen Drucks dieser Quellen lässt sich damit ebenfalls sehr gut bestimmen. Weiterhin lassen sich die Spektren von akustischem und hydrodynamischem Druck in Lüftungskanälen so erstmals durch digitale Wellenzahlfilterung trennen.



# A2: Geräuschreduktion der Kühlungseinrichtungen von technischen Anlagen und Geräten

- 1. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Abwärme von elektronischen Baugruppen und die daraus resultierenden thermischen Felder keinen nennenswerten Einfluss auf die Ausbreitung des Schalls hat, der von entsprechenden Lüftern generiert wird.
- 2. Die Realisierung von zwei umfangreichen Experimentalmodellen (für elektronisches Messgerät und Frequenz-Umrichter) erlaubt nunmehr die einfach zu handhabende Variation von Parametern, welche die strömungsbedingte Schallerzeugung und -ausbreitung in solchen Anlagen beeinflussen. Aus den entsprechenden Experimenten konnten Richtlinien für die Lärmminderung von luftgekühlten elektronischen Baugruppen abgeleitet werden. So senkt beispielsweise die Wahl einer optimalen Blechperforation den Schalldruckpegel um fast 9 dB im Vergleich zu den herkömmlich verwendeten Auslassblechen.
- 3. Die Ergebnisse von URANS-SST-Simulationen ermöglichen nunmehr die Identifikation von Strömungsschallquellen in den o.g. Geräten und Anlagen auf Basis von Quelltermen gemäß der Lighthill-Analogie.

#### A3: Aeroakustische Schallentstehung in Ventilatoren und deren Schallabstrahlung

- 1. Es wurde ein neues FE-Berechnungsverfahren zur Simulation der Schallabstrahlung von rotierenden aeroakustischen Quellen, wie sie beispielsweise in schnell laufenden Lüfterrädern auftreten, entwickelt. Dieses Verfahren wurde im Zuge des Projektes konzipiert, implementiert und validiert. Es erlaubt künftig das lärmarme Design von Radiallüftern auf der Basis von FE-Simulationen schon in der frühen Projektphase.
- 2. Es wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die folgende Vorgehensweise bei der Simulation von Radiallüftern in der derzeitigen Praxis am zielführendsten ist:
  - CFD-Rechnung auf Basis von URANS
  - Beschränkung des Rechengebietes auf ein einzelnes Segment eines Laufrades (mit periodischen Randbedingungen), um die erforderliche feine Orts- und Zeitauflösung praktikabel zu handhaben.
  - Anwendung des neu entwickelten FE-Berechnungsverfahrens (mit periodischen Randbedingungen) auf das Laufradsegment.

#### A4: Berechnung aerodynamischer Schallquellen gekapselter Heckrotoren

- Es wurden umfangreiche Strömungssimulationen (URANS-SST und SAS) von gekapselten Hubschrauber-Heckrotoren durchgeführt. Auf der Basis dieser Ergebnisse konnte anschließend mit Hilfe der Ffowcs Williams-Hawkings-(FW-H)-Analogie erstmals das aus der Rotation des Heckmotors resultierende Schallfeld für verschiedene Standard-Flugzustände berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen stimmen mit einer Abweichung von wenigen dB (bezüglich des Schalldruckpegels) mit Messungen überein, die bei DLR und ECD durchgeführt wurden. Die Möglichkeit, den Fenestron-Lärm zu berechnen, gestattet der Industrie, das akustische Verhalten schon im Designprozess zu berücksichtigen bzw. zu verbessern.
- 2. Aus dem Projekt resultiert eine neue, detaillierte Datenbasis, welche Ergebnisse für verschiedene Auflösungen turbulenter Skalen beinhaltet. Ausgehend davon können Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung im Hinblick auf eine Lärmminderung abgeleitet werden, wie z. B. die Unterdrückung der Strömungsablösung an der Eintrittslippe.



#### B1: Klangqualitätsbezogene Übertragungspfadanalyse und -synthese TPA / TPS

- 1. In Simulationen und Messungen wurden die Übertragungseigenschaften piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer unter Berücksichtigung nichtlinearer Verzerrungen untersucht und deren Eignung für die Verwendung bei klangqualitätsbezogenen Übertragungspfadanalysen nachgewiesen.
- 2. Bei der operationellen Transferpfadanalyse ist die Erfassung und Charakterisierung aller Teilschallquellen von großer Bedeutung für das Analyseresultat. Daher wurde zum einen untersucht, welche Schallquellen maßgeblich am Gesamtgeräusch eines Fahrzeugs beteiligt sind und zum anderen, wie diese sinnvoll durch geeignete Sensoren charakterisiert werden können. Diese Erkenntnisse können, auch außerhalb des Projekts, als Richtlinien für eine geeignete Sensorplatzierung dienen.
- 3. Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen wurde ein Konzept für die Analyse der Beiträge einzelner Schallquellen zum Gesamtgeräusch erstellt und in einer umfangreichen Messkampagne umgesetzt. Diese diente der Validierung der Methode. Die Analyse- und Validierungsmethoden wurden zum Teil bereits im Mess- und Auswertesystem des Projektpartners umgesetzt. Durch systematische Anwendung der Methoden wird eine effiziente Anpassung des Produktklangs während des Entwicklungsprozesses möglich.
- 4. Zur weiteren Auflösungsverbesserung wurde ein Verfahren zur Analyse der Beiträge schallabstrahlender Flächen zum Gesamtgeräusch untersucht. Eine Methode zur Phasensynchronisation mehrerer Messungen sowie Vereinfachungen, die zu deutlich verringertem Aufwand führen, wurden erfolgreich in einer Messkampagne bestätigt.
- 5. Durch zahlreiche Aktivitäten im Bereich der Psychoakustik konnte bei den anderen Teilprojekten des Forschungsverbundes die Anwendung der Psychoakustik bei der Geräuschbeurteilung verbreitet werden. Geräusche von Lüftern und Gebläsen wurden in psychoakustischen Experimenten beurteilt und Analysemethoden für eine erste instrumentelle Beurteilung konnten identifiziert werden. Mit Hilfe psychoakustischer Größen, wie zum Beispiel Lautheit oder Schärfe, wurden Simulationsergebnisse eines gekapselten Hubschrauberheckrotors bewertet. An den Geräuschen eines Messgerätesimulators wurden die mitunter großen Unterschiede durch die Blechperforation im Auslassblech mit psychoakustischen Methoden beurteilt.

#### B2: Fahrgastzellenakustik - Sound Design für PKW-Innenraum

- 1. Es wurde ein generisches Fahrzeugmodell auf Basis der SAE-Typ-4-Körperform aufgebaut und im Hinblick auf eine hohe Außengeräuschdämmung optimiert. Die Nachhallzeit im Innenraum wurde in Anlehnung an moderne PKWs abgeglichen. Mit Hilfe dieses Modells können die Ursachen von Spiegel-Windgeräuschen untersucht werden. Auch der Einfluss der Seitenscheiben (Glasart, Dicke, Doppelverglasung, etc.) kann experimentell untersucht werden.
- 2. Es wurde ein spezielles Mikrophon-Array konzipiert und aufgebaut, das aus 92 MEMS-Mikrophonen (Silizium-Mikrophone in Surface-Mount-Device-(SMD)-Technologie) besteht, die auf eine Leiterplatte gelötet werden. Mit Hilfe dieses Arrays ist es erstmals möglich, ortsaufgelöst den hydrodynamischen Druck vom akustischen Druck bei Strömungsanregung zu trennen. Damit ist auch die Lokalisierung von aeroakustischen Schallquellen möglich. Das Sparse-Array ersetzt ein vollbesetztes (43 x 43) Array. Die Verwendung eines Sparse-Arrays setzte die Entwicklung eines speziellen Algorithmus voraus, der die zu besetzenden Positionen der dünn besetzten Matrix bestimmt.



- 3. Es wurde ein neuartiges hybrides Simulationsverfahren entwickelt und softwaretechnisch implementiert. Dabei wird die gesamte Kette von der Strömungsanregung bis zur Innenraumakustik für einen Frequenzbereich oberhalb 1.000 Hz modelliert. Es basiert auf dem Corcos-Modell mit nachfolgender Finite-Elemente-Simulation der angeregten Seitenscheibe des PKWs mit anschließender Kopplung zu einem SEA-Modell (SEA = Statische Energie-Analyse), das letztlich den Transfer der mechanischen Energie von den Plattenstrukturen auf die Luft des Innenraums übernimmt.
- 4. Im Zuge von industriellen Anwendungen ist es möglich, in Zukunft insbesondere Formen von Außenspiegeln und anderen aeroakustisch relevanten Fahrzeugkomponenten schon in einer frühen Prototypphase auf ihre akustischen Eigenschaften hin zu untersuchen.

#### B3: Lärmreduktion bei elektrischen Leistungstransformatoren

- 1. Messplatz Single Sheet Tester (SST): Mit Hilfe eines neu entwickelten Magnetostriktionsmessplatzes ist erstmals die Bestimmung der magnetischen und magnetostriktiven Materialparameter von Transformatorblechen möglich. Dabei kann auch das anisotrope Materialverhalten erfasst werden, welches entscheidend für die korrekte Abbildung der Kernblechschwingungen ist. Der entwickelte Messplatz ermöglicht die Bestimmung aller für das entwickelte Simulationsverfahren notwendigen Materialdaten. Dies ist entscheidend für eine realitätsnahe Simulation von Transformatorgeräuschen unter Berücksichtigung der Anisotropie sowie von Hystereseeffekten.
- 2. Simulationsverfahren: Es wurde ein numerisches Berechnungsmodell für das gekoppelte Feldproblem von "Magnetik-Mechanik-Akustik" auf Basis von Messdaten entwickelt. Dabei wird erstmals das anisotrope nichtlineare Materialverhalten magnetostriktiver Transformatorbleche modelliert. Die einzelnen Feldprobleme können jeweils separat untersucht werden, so dass neben Verbesserungen der Schallabstrahlung beispielsweise auch Variationen zur Optimierung der magnetischen Flussverteilung im Transformatorkern berechnet werden können.
- 3. Modell-Transformator: Es wurde ein Modell-Transformator aufgebaut, der im wesentlichen dem Aufbau eines realen Leistungstransformators entspricht. Dieser (Dreiphasen-Trockentransformator) eignet sich für messtechnische Untersuchungen im Labor sowie für den Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen aus den FE-Simulationen. Es wurden Messungen der Oberflächenschnelle (mit Hilfe des Laser-Scanning-Vibrometers) durchgeführt, um das in der Simulation abgebildete Schwingungsverhalten zu validieren. Weiter wurde die Schallabstrahlung des Transformators mit Hilfe des in Teilprojekt A1 entwickelten Messsystems zur Kartierung von Schallfeldern erfasst und so das aufgrund der Kernschwingungen entstehende Schallfeld visualisiert. Damit war es möglich, die vermuteten Schallquellen im Verzapfungsbereich des Kerns nachzuweisen.



## 2.3. Gesamtbewertung

Die Forderung nach einer leiseren Umwelt gehört zu den zentralen Bedürfnissen unserer hochindustrialisierten Gesellschaft. Dieses Problems hat sich der Forschungsverbund FORLärm im Hinblick auf leisere Geräte, Maschinen und vor allem auch Verkehrsmittel angenommen. Die dabei erzielten Ergebnisse sind von großem Nutzen für Wissenschaft, Industrie und die Gesellschaft insgesamt.

Die hervorhebenswerten Punkte für die verschiedenen Gruppen sind im Einzelnen:

#### Industrie

- 1. FORLärm hat **wesentliche Erkenntnisse** über die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge gebracht, wie künftig Maschinen und Anlagen leiser gemacht werden können.
- 2. In FORLärm wurden **neue Methoden**, insbesondere numerische Rechenverfahren, entwickelt, die in der Design- und Optimierungsphase zu lärmarmen Produkten führen.
- 3. FORLärm lieferte **direkte Hinweise** für Konstruktionsverbesserungen im Hinblick auf
  - geringere Schallemission
  - angenehmen und wohlklingenden Sound von Produkten (Sound Design)
- 4. Infolge der Verankerung der Psychoakustik in FORLärm profitiert die Industrie vom direkten Bezug zur Wahrnehmung des Kunden.

#### Wissenschaft

- 1. FORLärm führte zu einem **wesentlichen Gewinn an Grundlagenkenntnissen** bezüglich der Schallentstehung und -ausbreitung bei technischen Komponenten und Anlagen, insbesondere von strömungsakustischen Quellen.
- 2. FORLärm führte zu **neuen Berechnungsverfahren** und **experimentellen Methoden**, um die Schallemission von technischen Geräten und Anlagen zu minimieren. Diese können auch als Basis für künftige Forschungsarbeiten genutzt werden.
- 3. Die Wissenschaft bindet nun verstärkt psychoakustische Überlegungen in ihre Darstellungen von Ergebnissen mit ein.
- 4. Die Kooperationen innerhalb FORLärm führten auch zu einem verbesserten Verständnis für die Bedürfnisse der Industrie.

#### Gesellschaft

- 1. Die Öffentlichkeitsarbeit von FORLärm hat das Bewusstsein der Bevölkerung für die Lärmproblematik in unserer Industriegesellschaft geschärft.
- 2. Die Gesellschaft kann psychoakustische Größen, wie die Lautheit, die der Wahrnehmung *direkt* entsprechen, besser einordnen als rein physikalische Größen wie den Schallpegel.
- 3. Die im Zuge von FORLärm initiierten Maßnahmen werden bereits in naher Zukunft auf den betroffenen Gebieten zu einer geringeren Lärmbelastung führen.
- 4. Infolge der thematischen Breite von FORLärm erreichen die Ergebnisse eine ebenso breite Bevölkerungsschicht.
- 5. Die enge Zusammenarbeit mit der Industrie sorgt für einen schnellen Transfer der erzielten Forschungsergebnisse in den Alltag der Bevölkerung.

## 3. Berichte der Teilprojekte

### A1. Geräuschreduzierung der Lüftungsanlagen von Niedrigenergie-& Passivhäusern

Beteiligte	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
Partner:	Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik,
	FAU Erlangen-Nürnberg
	ANSYS Germany, Otterfing
	ebm-papst, Landshut

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Lerch, Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg

#### A1.1. Ziele des Projektes

Lüftungsanlagen werden heute zunehmend in Wohnhäusern eingesetzt. Dort können auch geringe Geräuschpegel als störender Lärm empfunden werden. Dies wird 2004 in einer österreichischen Studie<sup>1</sup> belegt. Hier zeigte sich in einer Untersuchung zur technischen Qualität von Wohnraumbelüftungen in 92 Wohnhäusern Lärm als die am häufigsten genannte Beanstandung durch die Nutzer, wobei Körperschall, Strömungsschall und Luftschall als Ursachen genannt werden. Eigene Messungen an Lüftungsanlagen bestätigen, dass dieses Lärmproblem auch in Neubauten vorhanden sein kann. Der Aufbau solcher Anlagen ist dabei äußerst vielfältig. Von kompakten Klimageräten über dezentrale Lüftungsanlagen für einzelne Räume bis hin zu zentral gespeisten Lüftungssystem mit langen Lüftungskanälen aus Blech, Kunststoff oder gar Stoff sind im Hausund Wohnungsbau eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten vertreten.

Allgemein treten in luftführenden Systemen verschiedene Arten von Schallentstehungs- und Schallausbreitungsmechanismen auf. Bereits im Lüfter entsteht strömungsinduzierter Schall, der sich im Kanalsystem ausbreitet. Darüber hinaus regt der Lüfter durch seine Bewegung Bauteile, wie z.B. Kanalbleche, zu Schwingungen an. Dieser Körperschall kann sich wiederum ausbreiten und Luftschall abstrahlen. Aber auch im Kanalsystem selbst kann an Umlenkungen oder Hindernissen strömungsinduzierter Schall entstehen. Soll der von luftführenden Systemen erzeugte Lärm reduziert werden, so stellt sich die Frage, welchen Beitrag die einzelnen Lärmquellen zum Gesamtgeräusch liefern. Dabei spielt nicht nur die Quelle selbst, sondern auch der Übertragungsweg von der Quelle zum Hörer eine entscheidende Rolle. Ein Ziel dieses Projekts war daher die Trennung der unterschiedlichen Geräuschquellen in luftführenden Systemen und die Analyse der Übertragungswege. Dabei wurden Luftschall, Körperschall und strömungsinduzierter Schall betrachtet und auch deren Wechselwirkungen untereinander mit einbezogen. Weiterhin sollte geklärt werden, welche dieser Wechselwirkungen in Bezug auf Schallentstehung und Schallausbreitung in Lüftungssystemen relevant sind. Ein weiteres Ziel war die Erprobung von Simulationsverfahren, sowohl für die numerische Berechnung des strömungsinduzierten Schalls als auch für die Schallausbreitung und die Strukturmechanik. Die Simulationsverfahren sollten einerseits ein tieferes Verständnis der Vorgänge ermöglichen, andererseits aber auch die Vorausberechnung von Schalldruckpegeln erlauben. Aufgrund der Vielfalt an Lüftungsanlagen stand in diesem Projekt vor allem die Methodenentwicklung im Vordergrund. Ziel war also nicht die Ge-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>A. Greml, E. Blümel, R. Kapferer und W. Leitzinger. Technischer Status von Wohnraumlüftungen. Technischer Bericht, Kufstein, 2004.



räuschreduzierung einer Musteranlage, sondern vielmehr das Erarbeiten von Vorgehensweisen, Simulations- und Messmethoden, um einen möglichst breiten Bereich an Anlagentypen abzudecken. Dies geschah auch im Hinblick auf die beteiligten Industriepartner ANSYS und ebm-papst, die ebenso an keiner speziellen Einzellösung, sondern vielmehr an Methodenwissen interessiert sind.

#### A1.2. Ergebnisbericht

Die Trennung einzelner Geräuschquellen spielt eine zentrale Rolle in diesem Projekt. Unter "Trennung" ist hier sowohl die räumliche Trennung einzelner Geräuschquellen als auch die Trennung unterschiedlicher Geräuschentstehungsmechanismen zu verstehen. Es soll also nicht nur zwischen sich ausbreitendem Luftschall, sekundärem Luftschall und strömungsinduziertem Schall unterschieden werden, sondern deren jeweiliger Ursprung lokalisiert werden können.

#### Luftschall infolge von Körperschall

Der Beitrag des sekundären Luftschalls zum Gesamtgeräusch lässt sich für einfache Geometrien gut mit der Finite-Elemente-Simulation abbilden. Bei bekannter mechanischer Anregung und hinreichend exaktem Finite-Elemente-Modell kann so mittels gekoppelter Struktur-Akustik-Simulation der abgestrahlte sekundäre Luftschall berechnet und so getrennt von anderen Schallentstehungsmechanismen betrachtet werden. Messungen und FE-Simulation an industriell gefertigten Lüftungskanälen haben jedoch gezeigt, dass derartige FE-Simulationen extrem hohe Anforderungen an die Modellierung stellen und einen entsprechenden personellen Aufwand nach sich ziehen. Deshalb lassen sich für die praktische Anwendung keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen. Infolge dessen wurde ein hybrides Verfahren konzipiert und angewandt, das die Schallabstrahlung basierend auf Messdaten berechnet. Das zugrunde liegende Vorgehen ist in Abbildung A1.1 anhand der Schwingungen einer Flachkanalwand veranschaulicht.



**Abbildung A1.1:** Finite-Elemente-Simulation auf Basis von Vibrometer-Messdaten



**Abbildung A1.2:** Finite-Elemente-Simulation auf Basis von Laser-Scanning-Vibrometer-Messdaten eines Raumluftentfeuchters bei 50 Hz (Seitenansicht)

Zunächst werden alle interessierenden Oberflächen phasenrichtig mit einem Laser-Scanning-Vibrometer vermessen. Die so erfasste örtlich aufgelöste Oberflächenschnelle wird dann auf ein Finite-Elemente-Gitter interpoliert. Hierbei wird die Oberflächenschnelle direkt als akustische Schnelle vorgegeben. Modellierung und FE-Simulation der Strukturmechanik entfallen. Neben der spektralen Darstellung der Schallabstrahlung für einzelne Beobachterpunkte ermöglicht die messdatengestützte Simulation auch eine anschauliche räumliche Darstellung der Bereiche, die maßgeblich zur Schallabstrahlung beitragen. Abbildung A1.2 zeigt hierzu die Schallabstrahlung eines Raumlufttrockners, der zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit in Wohnräumen eingesetzt



wird. Das Gerät besteht im Wesentlichen aus einem Kompressor und einem Lüfter. Die Raumluft wird rückseitig angesaugt und an der Oberseite des Gerätes ausgestoßen. Der abgegebene Lärm ist von einer tonalen, durch den Kompressor verursachten Komponente, und durch ein breitbandiges Rauschen geprägt. Die Abbildung A1.2 zeigt die Schallabstrahlung bei der Betriebsfrequenz des Kompressors von 50 Hz in der Seitenansicht. Das Ergebnis macht deutlich, dass Schall in erster Linie über die Gerätefront abgestrahlt wird.

Das Verfahren wurde darüber hinaus auf eine Lüftungsanlage mit dezentralen Belüftungseinheiten einer Neubauwohnung angewandt. Die Einheit aus Lüfter und Wärmetauscher



Abbildung A1.3: Anteil des durch Strukturschwingungen verursachten Luftschalls am Gesamtgeräusch einer dezentralen Lüftungseinheit in einem Abstand von 50 cm)

ist hierbei direkt in die Außenwand integriert und zum Innenraum hin mit einer Kunststoffabdeckung versehen. Auf deren Oberseite befindet sich die Luftaustritts- bzw. Ansaugöffnung. Das Geräusch der Lüftereinheit war von störenden tonalen Komponenten geprägt. Es sollte ermittelt werden, welche Geräuschkomponenten über das Gehäuse und welche über die Öffnung nach außen treten. Hierzu wurde die Abdeckung mit dem Laser-Scanning-Vibrometer vermessen und die Messdaten auf ein entsprechendes Finite-Elemente-Gitter aufgebracht. Dabei wurden die Decke und die der Lüftereinheit nahen Wände mit berücksichtigt, um eventuelle Reflexionen mit einzubeziehen. Das Ergebnis ist in Abbildung A1.3 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die dominanten tonalen Komponenten bei 100 Hz und 130 Hz vollständig auf den von der Abdeckung abgestrahlten sekundären

Luftschall zurückzuführen sind. Das breitbandige Geräusch hingegen tritt folglich nahezu ausschließlich über die Öffnung nach außen.

#### Dreidimensionale Schallfeldkartierung zur Lokalisierung von Teilschallquellen

Das Schallfeld um eine Lärmquelle gibt Aufschluss über die Position einzelner Teilschallquellen sowie deren Beitrag zum insgesamt emittierten Schall. Um eine schnelle und einfache Kartierung des Schallfeldes zu ermöglichen, wurde ein Messsystem entwickelt, das die Position eines Mikrofons ermittelt und so dem gemessenen Schalldrucksignal einen Ort zuordnen kann. Das Mikrofon ist hierzu an einem handgeführten Marker angebracht, der mit einem Ultraschallsender ausgestattet ist. Mittels Laufzeitmessung zwischen Marker und im Raum verteilten Ultraschallempfängern wird dessen Position bestimmt. Das Messsystem stellt in dieser Form eine Neuheit dar. Die bisher verfügbaren Systeme basieren auf einer optischen Lokalisierung des Mikrofons und erfordern daher Sichtkontakt zwischen Kamera und Mikrofon. Messungen um ein Objekt herum sind daher nicht möglich. Auch sind die Arbeitsabstände zwischen Kamera und Mikrofon begrenzt, was Messungen an großen Messobjekten erschwert. Das entwickelte Messsystem hingegen kann ein Messvolumen von etwa  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  aufspannen. Auch gegenüber Mikrofonarrays bietet das Messsystem Vorteile. Es ist sehr viel kostengünstiger, einfacher in der Handhabung und auch für sehr niedrige Frequenzen unter 100 Hz geeignet. Da das Messsystem für jeden Messort ein Zeitsignal aufzeichnet, ist eine umfangreiche und flexible Nachauswertung möglich. So wurde neben einer frequenzaufgelösten räumlichen Darstellung des Schallfeldes die Berechnung der stationären Lautheit implementiert. Der Matlab-Code für die Berechnung der Lautheit konnte dabei vom Teilprojekt A2 - "Geräuschreduktion der Kühlungseinrichtungen von technischen Anlagen und Geräten" übernommen werden.

Ein Beispiel für das Identifizieren von Lärmquellen zeigt Abbildung A1.4. Dargestellt ist das Schallfeld um den bereits im vorherigen Abschnitt erwähnten Raumlufttrockner bei 2,1 kHz mit



und ohne Auslassgitter an der Luftaustrittsöffnung (Abbildung A1.4a und Abbildung A1.4b). Die Messung zeigt hierbei das Luftauslassgitter als Hauptlärmquelle für den gewählten Frequenzbereich. Ein Entfernen des Gitters führt entsprechend zu einer verminderten Schallabstrahlung. Derartig anschaulich visualisierte Messungen spielen im industriellen Umfeld eine wichtige Rolle, da sie auch ohne tiefergehendes akustisches Vorwissen leicht zu interpretieren sind. Dies gilt besonders in Verbindung mit der Darstellung der Lautheit als wichtige psychoakustische Größe.

Das System ermöglicht nicht nur das Lokalisieren von Schallquellen, sondern auch die Analyse von Strukturschwingungen. Abbildung A1.5 zeigt beispielhaft die vierte Strukturmode einer Flachkanalwand, die durch die Schwingungen eines angeschlossenen Querstromlüfters angeregt wird. Zwar ist so keine Aussage über den Absolutbetrag der Auslenkung der Kanalwand möglich, jedoch lassen sich schnell und einfach Schwingformen und Strukturmoden identifizieren.



**Abbildung A1.4:** Schallfeld eines Raumlufttrockners bei 2,1 kHz mit und ohne Auslassgitter

**Abbildung A1.5:** Schallfeld infolge der Strukturschwingungen einer Flachkanalwand mit angeschlossenem Lüfter für die vierte Strukturmode bei 106 Hz

#### Messtechnische Lokalisierung von aeroakustischen Quellen innerhalb der Strömung

Im Teilprojekt B2 "Fahrgastzellenakustik - Sound Design für PKW-Innenraum" wurde ein neuartiges Mikrofonarray entwickelt, das die Trennung von akustischem und hydrodynamischem Druck auf der Pkw-Seitenscheibe ermöglicht. Obwohl ursprünglich nicht für Messungen in Lüftungskanälen konzipiert, hat sich gezeigt, dass sich das Verfahren auch hier sehr gut einsetzen lässt. Hierbei stehen zwei Fragestellungen im Vordergrund: Zum Einen die Bestimmung der Schalleinfallsrichtung auf das Messarray und somit die Lokalisierung von Schallquellen. Zum Anderen die Quantifizierung des Luftschallanteils am Gesamtdruck und die Berechnung eines Schalldruckpegel-Frequenz-Spektrums zur Charakterisierung der Schallquelle.

Um die Möglichkeit der Quellenortung zu testen, wurde ein Strömungshindernis (vorwärtsrückwärts-springende Stufe) in einem Flachkanalmodell mit angeschlossenem Querstromlüfter eingebracht. Das Messarray wurde wandbündig zwischen Lüfter und Strömungshindernis positioniert. Abbildung A1.6 zeigt das gemessene Wellenzahl-Frequenz-Spektrum.

In diesem sind zwei Keulen zu sehen, die durch den Schall von Lüfter und Stufe hervorgerufen werden. Die dritte durch den hydrodynamischen Druck verursachte Keule ist für diese Konfiguration nicht erkennbar und ist daher eingezeichnet. Die beiden durch akustischen Druck verursachten Keulen verlaufen aufgrund der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls gegenüber der Strömung steiler und deshalb im Bereich betragsmäßig kleinerer Wellenzahlen. Vergleicht man die beiden Keulen von Lüfter und Stufenhindernis, so weisen diese unterschiedliche Vorzeichen für die Wellenzahl auf, was einem entgegengesetzten Schalleinfallswinkel entspricht. Das Verfahren eignet sich demnach, um Schallquellen in Lüftungsanlagen auch innerhalb des Strömungsfeldes zu lokalisieren.





Abbildung A1.6: Wellenzahl-Frequenz-Spektrum: Schalleinfall aus Richtung der Stufe und des Lüfters







Abbildung A1.8: Akustischer Druck und hydrodynamischer Druck der turbulenten Grenzschicht (TBL) bei größerem Abstand (13 cm) zwischen Lüfter und Messarray und niedriger Drehzahl (1200 U/min)

Weiterhin sollte geklärt werden, ob sich Schalldruckpegel-Frequenz-Spektren von Schallquellen im Kanal berechnen lassen. Aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schall und Strömung können diese mittels Wellenzahlfilterung getrennt und in den Frequenzbereich transformiert werden. Das Verfahren wurde zunächst mit einer Doppelzylinderkonfiguration innerhalb eines Flachkanals getestet. Dabei konnten die gut vorhersagbaren tonalen Komponenten im akustischen Druck sehr gut rekonstruiert werden. Dies war auch dann der Fall, wenn der berechnete akustische Druck unterhalb des berechneten hydrodynamischen Druckes lag. Messungen des Teilprojektes B2 haben ergeben, dass akustische Drücke, die bis zu 30 dB unter den hydrodynamischen Drücken liegen, noch korrekt detektiert werden können.

Nun wurde das Vorgehen auf den Versuchsaufbau aus Flachkanal, angeschlossenem Querstromlüfter und Strömungshindernis (vorwärts-rückwärts-springende Stufe) angewandt. Dabei wurden verschiedenen Anordnungen mit und ohne Stufenhindernis, mit zwei verschiedenen Lüfterorientierungen und mit unterschiedlichen Lüfterdrehzahlen vermessen. Ausgewählte Ergebnisse sind in den Abbildungen A1.6 bis A1.8 dargestellt. Die Konfiguration mit Lüfterdrehzahl, Lüfterorientierung und nicht maßstäblicher Arrayposition ist jeweils mit abgebildet.

Die bereits angesprochene Abbildung A1.6 zeigt auch, dass in Anwesenheit eines Lüfters mit entsprechend hoher Schallabstrahlung das Stufenhindernis als Schallquelle noch detektierbar bleibt. Die durch die Stufe verursachte Keule im Wellenzahl-Frequenz-Spektrum ist zwar nur leicht erkennbar, in Messungen ohne Stufe ist sie jedoch gar nicht vorhanden. Die Abbildungen A1.7 und A1.8 zeigen die berechneten Schalldruckpegel-Frequenz-Spektren für zwei Konfigurationen ohne Stufe. Dabei ist zu erkennen, dass abhängig von Lüfterorientierung und Abstand zwischen Lüfter und Messarray sowohl der hydrodynamische als auch der akustische Druck überwiegen kann. Messungen mit 1/8-Zoll-Mikrofonen über Bohrungen in der Kanalwand bestätigen dieses Ergebnis. Weiterhin zeigen die Abbildungen A1.7 und A1.8 deutlich die akustischen Resonanzen, die sich aufgrund der Länge des Flachkanals von 1 m ergeben. Die Lage der Resonanzstellen bezüglich der Frequenz ist dabei erwartungsgemäß abhängig von der Position des Messarrays im Kanal.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass in Lüftungskanälen akustischer oder hydrodynamischer Druck überwiegen kann und Messungen mit herkömmlichen Mikrofonen kaum Rückschlüsse auf die Schallquellen im Kanal zulassen. Das vorgestellte Messverfahren stellt daher ein wichtiges und leistungsfähiges Instrument bei der Lokalisierung und Charakterisierung von aeroakustischen Schallquellen in Lüftungskanälen dar.



#### Schallentstehung an Luftauslässen

Der Luftauslass stellt eine wichtige Komponente der Lüftungsanlage dar. Schall, der dort entsteht, wird direkt in den Wohnraum emittiert. Daher wurden drei typische Luftauslassgeometrien auf ihre Schallerzeugung hin untersucht: Diffusoren, horizontal angeordnete Lamellen und horizontal angeordnete Rundstäbe. Die Diffusoren erzeugten dabei ein breitbandiges Rauschen, wohingegen bei Lamellen und Rundstäben bereits bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $4 \frac{m}{c}$ deutliche tonale Komponenten auftraten. Zu deren Analyse wurde das Verfahren der Refrakto-Vibrometrie eingesetzt und somit auf die Anwendbarkeit für niedrige Strömungsgeschwindigkeiten hin geprüft. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung A1.9 dargestellt. Der Laserstrahl eines Scanning-Vibrometers wird von einem starren Reflektor zurückgeworfen. Dabei durchquert er das Strömungsgebiet im Nachlauf des Luftauslasses, wobei die Druckschwankungen innerhalb der Strömung zu einer Veränderung der optischen Weglänge führen. Somit werden die Druckschwankungen sichtbar. Als Triggersignal diente hierbei ein Hitzdrahtanemometer, das im Nachlauf des Auslassgitters positioniert war. Abbildung A1.10 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung. Die periodischen Druckschwankungen in der oberen Bildhälfte sind klar zu erkennen. Sie zerfallen mit zunehmendem Abstand vom Auslassgitter. Weiterhin fällt auf, dass die benachbarten Wirbelstraßen einen festen Phasenbezug von 180° zueinander haben. Um die regelmäßige Wirbelablösung zu stören, wurden Lamellen und Rundstäbe mit dünnen Nylonfäden umwickelt. Die Resultate für die Lamellen sind in Abbildung A1.11 zu sehen. Abhängig vom Durchmesser der Nylonfäden und der Wicklung lässt sich der tonale Beitrag reduzieren oder sogar komplett unterbinden. Ein Anstieg des breitbandigen Geräuschanteils ist nicht zu beobachten. Der Anstieg der Frequenz der tonalen Komponenten ist durch die lokale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Querschnittsminderung durch die Nylonfäden begründet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Lautheit tonaler Komponenten bei der Schallentstehung an Lüftungsgittern effizient vermindern lässt, ohne den breitbandigen Geräuschanteil nachteilig zu beeinflussen. Das Verfahren der Laser-Refrakto-Vibrometrie eignet sich bereits bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten für die Identifizierung der Schallquelle und zur Analyse der Schallentstehung. So lässt sich beispielsweise die Frage klären, ob tonale Geräuschkomponenten erst am Kanalausgang entstehen, oder bereits an anderer Stelle im Lüftungssystem oder am Lüfter erzeugt werden.

Hitzdrahtsonde

Abbildung A1.9: Aufbau Laser-Refrakto-Vibrometrie



**Abbildung A1.10:** Ergebnis der Laser-Refrakto-Vibrometrie für horizontal angeordnete Rundstäbe



Abbildung A1.11: Einfluss der Umwicklung horizontaler Lamellen auf den Schalldruckpegel

#### Berechnung des aeroakustischen Schalls durch Strömungshindernisse

In Kooperation mit dem Industriepartner ANSYS Germany wurden skalenaufgelöste Simulationstechniken zur Charakterisierung von turbulenten Strömungen in Lüftungsanlagen und der dadurch verursachten Schallentstehung und Ausbreitung angewendet. Dazu wurde ein generisches Modell eines Lüftungskanals mit einer überströmten Stufe variabler Länge nachgebildet. Für die aeroakustische Berechnung wurde neben den Strömungslösern ANSYS Fluent und CFX



das am Lehrstuhl für Sensorik entwickelte Simulationspaket CFS++ verwendet. Dabei wurden basierend auf einer skalenauflösenden Simulation die akustischen Quellterme berechnet und anschließend die Schallausbreitung mittels Finite-Elemente-Methode simuliert. Die Simulationen wurden durch begleitende Versuche validiert. Da sich bei den akustischen Messungen ein Einfluss der Stufenlänge auf die abgestrahlte Akustik feststellen ließ, wurde eine komplette Aeroakustik–Simulation für die kürzeste (l = 15 mm) und längste (l = 45 mm) Stufe durchgeführt. Zur Validierung der Strömungssimulationen wurden folgende experimentelle Untersuchungen durchgeführt:

- Ölanstrichversuche zur Charakterisierung der Strömungstopologie
- Laser-Lichtschnitt-Aufnahmen mit einer High-Speed Kamera zur Visualisierung der dynamischen Vorgänge bei der Stufenüberströmung
- Hitzdraht-Messungen der Zustrombedingungen
- Messung der statischen Wanddruckverteilung entlang der Strömung über die Stufe
- Messung des dynamischen Wanddrucks
- Korrelationsmessungen zwischen dem dynamischen Wanddruck im Kanal und dem Schalldruck hinter dem Auslass des Kanals

Die Strömung wurde mittels einer embedded large eddy simulation (eLES) und einer reinen LES simuliert, wobei durch die Verwendung des zonalen Konzeptes der eLES eine Rechenzeitersparnis erzielt werden kann. In Abbildung A1.12a ist der gemessene Druckbeiwert über die Stufe hinweg im Vergleich zur eLES dargestellt. Es kann eine quantitativ gute Übereinstimmung festgestellt werden. Abbildung A1.12b zeigt das gemessene Oktavbandspektrum im Vergleich zur Simulation für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s und die kurze (schwarz) und lange (rot) Stufe. Wie sich erkennen lässt, wird sowohl der Trend als auch der absolute Pegel gut getroffen.



(a) Vergleich des Druckbeiwertes zwischen Simulation und Experiment für die lange Stufe



(b) Vergleich des Schalldruckpegels am Kanalausgang zwischen Simulation und Experiment für kurze und lange Stufe (Oktavbandspektrum)

Abbildung A1.12: Vergleich zwischen Experiment und Simulation

Eine der Stärken der Simulation ist die Möglichkeit, neben der Akustik auch eine genaue Analyse der turbulenten Strömung durchführen zu können. So ist in Abb. A1.13 die zeitgemittelte turbulente kinetische Energie (TKE) zusammen mit den auf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit basierenden Stromlinien dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass zwar der Maximalwert der TKE für die lange Stufe leicht höher liegt, allerdings ist das Rezirkulationsgebiet auf der Stufe geschlossen und tritt nicht mit dem Rezirkulationsgebiet hinter der Stufe in Interaktion.



Dies ist allerdings bei der kurzen Stufe der Fall, so dass sich eine erhöhte TKE im Nachlauf der kurzen Stufe ergibt. Integriert man die TKE über das Strömungsgebiet, ist der integrierte Wert im Fall der kurzen Stufe fast um einen Faktor 2 größer, verglichen mit der langen Stufe.





#### A1.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projektes wurden Verfahren entwickelt und getestet, die es ermöglichen, die Schallentstehung in Lüftungsanlagen sowohl zu lokalisieren als auch hinsichtlich des Schallentstehungsmechanismus zu analysieren und zu charakterisieren. Dabei kommen messtechnische, numerische und hybride Verfahren zum Einsatz.

Für den Industriepartner ANSYS Germany stellt sich der Mehrwert im Teilprojekt zum einen durch den Nachweis einer sehr hohen Qualität der aeroakustischen Berechnungen im Zusammenhang mit der Grobstruktursimulation dar. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die von ANSYS Germany neu zur Verfügung gestellte zonale Grobstruktursimulation (eLES) gleichbleibend gute Ergebnisse liefert bei im Vergleich zu einer LES geringerem Rechenaufwand. Es konnte gezeigt werden, dass es im Rahmen der im Projekt behandelten Lüftungskanäle möglich ist, grundlegende Effekte mittels CAA sowohl qualitativ als auch quantitativ im zeitlichen Rahmen von ca. 3 Wochen abzubilden. Somit stellt die in diesem Teilprojekt verwendete Technologie eine Möglichkeit zur akustischen Analyse im Bereich der Vorentwicklung dar.

Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die akustischen Quellen, die am Interface zur LES-Region erzeugt werden (die Kontinuitätsgleichung wird nur innerhalb der Ebene exakt erfüllt), keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Qualität der CAA Ergebnisse haben. Dies unterstreicht die gute Eignung der eLES für aeroakustische Simulationen.

Weiterhin wurde ein Vergleich skalenauflösender Simulationsverfahren für Strömungen in Lüftungskanälen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass im Rahmen dieses Teilprojektes vor allem die Large-Eddy-Simulation den breitbandigen Charakter der Strömung für den Testfall auflösen konnte. Die embedded LES konnte zudem den Rechenaufwand im Vergleich zu einer LES um ca. 20% reduzieren. Sowohl die Strömungssimulation als auch die Schallausbreitung im Kanalsystem wurden umfangreich messtechnisch validiert und dienen so ebenfalls zur Validierung der Simulationssoftware.

Die Schallentstehungs- und Ausbreitungsmechanismen in Lüftungssystemen stellten ein weiteres zentrales Thema des Projektes dar. Dabei wurde auch die Relevanz eventueller Wechselwirkungen untersucht. Es zeigte sich, dass Schall infolge strömungsinduzierter Strukturschwingungen im Vergleich zum Strömungsgeräusch vernachlässigt werden kann. Als entscheidend stellte sich hingegen die Wechselwirkung aus Luftschall im Kanal und den Kanalwänden heraus. Hier wurde der Einfluss gekoppelter Schwingungen (Luftschall - Struktur) messtechnisch nachgewiesen und simulativ abgebildet. Finite-Elemente-Simulationen mit Akustik-Struktur-Interaktion legen nahe, dass sich durch gezielte Auslegung der Kanalgeometrie die über die Kanalwände abgestrahlte akustische Leistung beeinflussen lässt. Der von ebm-papst in das Projekt eingebrachte



bürstenlose Querstromventilator kam in allen Untersuchungen, in denen der Lüfter als Quelle für strömungsinduzierten Lärm oder Körperschall mit einbezogen wurde, zum Einsatz. Darüber hinaus wurden gezielt Messungen zur Körperschallgenerierung durch den Lüfter durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass nahezu ausschließlich die vierte Motorordnung und deren Harmonische effektiv Körperschall in den angeschlossenen Kanal einkoppeln. Als Ursache wurde nicht, wie zunächst erwartet, eine Unwucht der Lüfterwalze, sondern vielmehr der Motor identifiziert. Derzeit wird geprüft, inwieweit ein Lüfterprototyp mit entsprechend verändertem Motor realisierbar ist.

Neben direktem Erkenntnisgewinn konnte die methodische Kompetenz in Bezug auf die messtechnische Trennung von Schallentstehungs- und Schallausbreitungsmechanismen und in der CAA-Simulation erreicht werden. Der Industrie stehen somit neue und verfeinerte Werkzeuge zur Verfügung, die es ermöglichen, leisere Lüftungsanlagen zu entwickeln und Produkte, wie zum Beispiel Lüfter, lärmarm einzusetzen.

#### A1.4. Publikationen & Patente

- BECKER, S. ; SCHEIT, C. ; MÜLLER, S. ; SPRINGER, M. ; MÜNSTERJOHANN, S. ; GRABINGER, J. ; LERCH, R. ; KALTENBACHER, M. ; HÜPPE, A. ; OSWALD, M. ; FLURL, B. ; SCHEUERER, G.: Aeroacoustic Predictions for Technical Applications Based on ANSYS Flow Simulations. In: ANSYS Conference & 31st CADFEM Users' Meeting, 2013. – Mündliche Präsentation. Mannheim, 19. - 21.06.2013
- [2] HORN, P. ; KNIESBURGES, S. ; GRABINGER, J. ; BECKER, S. ; LERCH, R.: Untersuchungen zur Lärmentstehung und -abstrahlung von Lüftungsanlagen. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2011*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2011. – ISBN 978–3–939296–02–7, S. 141–142. – Düsseldorf, 22. - 24.03.2011
- HORN, P. ; METZGER, J. ; WÜST, M. ; LERCH, R.: System for Spatially Resolved Sound Field Measurements. In: Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1957–1960. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013
- [4] HORN, P.; SCHEIT, C.; GRABINGER, J.; BECKER, S.; LERCH, R.: Untersuchungen zur Lärmentstehung und -abstrahlung von Lüftungsanlagen. In: Fortschritte der Akustik DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. ISBN 978–3–939296–04–1, S. 931–932. Darmstadt, 19. 22.03.2012
- [5] SCHEIT, C. ; HORN, P. ; WEBER, J. ; BECKER, S.: Numerical Investigation of Noise Generation Mechanisms in Ventilation Systems using Scale-Resolving Techniques. In: *International Conference* on Acoustics AIA-DAGA 2013. – Mündliche Präsentation. Merano (Italien), 18. - 21.03.2013
- [6] SCHEIT, C. ; HORN, P. ; WEBER, J. ; BECKER, S.: Numerische Untersuchungen der Schallentstehungsmechanismen in Lüftungsanlagen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1, S. 285–286. – Darmstadt, 19. – 22.03.2012



## A2. Geräuschreduktion der Kühlungseinrichtungen von technischen Anlagen und Geräten

Beteiligte	Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik,
Partner:	FAU Erlangen-Nürnberg
	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
	Rohde & Schwarz, München
	Siemens, Industry Sector, Nürnberg
Projektleiter:	apl. Prof. DrIng. S. Becker, Prof. Dr. Ing. E. Schlücker, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, FAU Erlangen-Nürnberg

#### A2.1. Ziele des Projektes

Die stetig wachsenden Anforderungen an technische Anlagen und Geräte führen zu einer immer höheren Leistungsaufnahme. Gleichzeitig wird die erhöhte Funktionalität der entsprechenden Baugruppen im bereits vorhandenen Bauraum integriert, sodass eine erhöhte Bebauungsdichte der Komponenten daraus resultiert. Als Folge der gestiegenen Integrationsdichte der elektrischen Baugruppen erhöht sich die volumenbezogene Verlustleistung. Zur Abfuhr der Wärme reicht in den meisten Fällen eine passive Kühlung der Komponenten nicht mehr aus, sodass die Konvektion erzwungen werden muss. Die aktive Kühlung bringt neben dem Vorteil des erhöhten Wärmeabtransports den Nachteil der zusätzlichen Geräuschentstehung mit sich. Da die elektronischen Komponenten keinen Schall abstrahlen, tritt die aktive Kühlung als Geräuschquelle in den Vordergrund. Solange die Umwelt durch die Schallemissionen nicht beeinträchtigt wird, ist die akustische Abstrahlung zu vernachlässigen. In vielen Fällen werden aktiv gekühlte Komponenten jedoch in der unmittelbaren Umgebung von Menschen eingesetzt, wie z. B. bei PC-Lüftern, Motorkühlern, Klimaanlagen usw. Das vorrangige Ziel, neben der Sicherstellung einer ausreichenden Kühlung, muss folglich die Minimierung der Geräuschbelästigung der Umwelt durch die Kühlung sein.

Die im Rahmen dieses Teilprojektes zu untersuchenden Kühlungen wurden durch die Unternehmensfelder der beiden beteiligten Industriepartner festgelegt. Die Firma Rohde & Schwarz als führendes Unternehmen in der Hochfrequenztechnik entwickelt und produziert hauptsächlich technische Geräte zur Funk- und Datenübertragung sowie -analyse. Als Forschungsobjekt wurde hier ein Breitband-Radio-Kommunikationstester, wie er hauptsächlich bei der Produktion von Mobilfunktelefonen zum Einsatz kommt, gewählt. Das Gerät beinhaltet mikroelektronische Baugruppen, die aufgrund ihrer Bebauungsdichte, aktiv gekühlt werden müssen. Die maximale Verlustleistung des Messgerätes liegt bei ca. 800 Watt. Die Kühlung des Messgerätes wurde hinsichtlich der Einflussparameter auf die akustische Schallabstrahlung untersucht.

Als weiterer Industriepartner ist die Firma Siemens am Teilprojekt A2 beteiligt. Im Gegensatz zur eingesetzten Mikroelektronik der Firma Rohde & Schwarz liegt der Fokus hier auf der Kühlung der Leistungselektronik großer Elektromotoren mit einer Leistungsaufnahme im dreistelligen Kilowattbereich und einer Verlustleistung von ca. 6,6 kW. Diese Elektromotoren werden über Frequenzumrichter gespeist, die die gesamte Leistung zur Verfügung stellen. Die Verlustleistung der Leistungselektronik wird bisher separat über eine eigene Luftkühlung abgeführt. Die Integration der Leistungselektronik auf den Elektromotor soll die Kühlung unter Nutzung des Motorlüfters ermöglichen, sodass der zusätzliche Lüfter als Schallquelle entfallen kann.

Neben den offensichtlichen Schallquellen, wie dem Lüfter und der Strömungsführung, wird der Einfluss der Temperatur auf die Schallabstrahlung untersucht. Hierzu wurde ein Grundlagenexperiment in Form eines beheizten, luftüberströmten Rechteckzylinders durchgeführt.

Ausgehend von den Ergebnissen, die im Grundlagenexperiment erzielt wurden, sollten die Programmpakete zur Strömungssimulation "FASTEST-3D" (Lehrstuhl für Prozessmaschinen und



Anlagentechnik) bzw. "ANSYS CFX" mit dem Finite-Elemente-Programm zur Schallfeldberechnung "CFS++" des Lehrstuhls für Sensorik unter der Berücksichtigung inhomogener Temperaturfelder gekoppelt werden. Die Kopplung der Programmpakete sollte die Simulation der Strömung für nicht-isotherme Fälle mit anschließender Berechnung der akustischen Schallausbreitung ermöglichen.

Basierend auf diesen gekoppelten Programmpaketen sollten automatische Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden, um den Einfluss unterschiedlicher Größen, wie Reynoldszahl, Turbulenz, Geometrie und Leistung, zu berücksichtigen und eine optimale Konfiguration hinsichtlich minimaler akustischer Schallabstrahlung bei gleichzeitig maximaler Wärmeabfuhr zu finden.

Gemeinsam mit der Firma Rohde & Schwarz sollte basierend auf dem vorhandenen Messgerät ein vereinfachtes, abstrahiertes Modell gebaut werden, anhand dessen grundlegende Untersuchungen hinsichtlich der Parameter einer geräuscharmen Kühlung durchgeführt werden können. Das Modell sollte hierbei die Möglichkeit bieten, eine Vielzahl vorhandener Parameter variieren zu können, während die strömungsmechanischen Eigenschaften dem Original nachempfunden sind. Weiterhin musste die optische Zugänglichkeit für laseroptische Untersuchungen am Modell gewährleistet werden.

Das neuartige, integrierte Kühlkonzept der Firma Siemens sollte in einem Versuchsaufbau realisiert werden. Dieser wurde hinsichtlich seiner akustischen und thermischen Eigenschaften untersucht. Da es sich um ein noch nicht im kommerziellen Einsatz befindliches System handelt, galt es zunächst, die Kühlleistung des Systems zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der notwendigen Wärmeabfuhr galt es, die akustischen Eigenschaften des Kühlsystems zu verbessern.

Für beide experimentellen Aufbauten wurden parallel mittels numerischer Methoden akustische Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen können einerseits anhand der Experimente validiert werden und andererseits im späteren Entwicklungsprozess zur Vorhersage der Effizienz bestimmter Maßnahmen herangezogen werden.

#### A2.2. Ergebnisbericht

#### Grundlagen-Experiment: umströmter, beheizter Zylinder

Zu Beginn des Projektes wurde der Einfluss der Temperatur bzw. inhomogener Temperaturfelder in Strömungen auf die Schallausbreitung untersucht. Das Grundlagenexperiment wurde am akustischen Windkanal des Lehrstuhls für Sensorik der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt. Ein auf einer ebenen Platte montierter, beheizter Rechteckzylinder wurde hierzu, wie in Abb. A2.1a exemplarisch dargestellt, mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten angeströmt. Die durch die Wechselwirkung von Zylinder und Strömung entstehenden akustischen Druckschwankungen wurden mit mehreren Mikrofonen erfasst und mit dem Referenzfall, dem unbeheizten Zylinder in der Strömung, verglichen. Sowohl Temperatur, Zylinderhöhe und



Abbildung A2.1: Grundlagenexperiment: beheizter Zylinder



Strömungsgeschwindigkeit wurden variiert. Abbildung A2.1b zeigt beispielhaft die frequenztransformierten akustischen Signale eines unbeheizten und eines auf 150 °C beheizten Zylinders mit 30 mm Höhe bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s. Aufgrund der sehr geringen Unterschiede in den akustischen Signalen wurde einvernehmlich entschieden, dass für die nachfolgenden Untersuchungen der Einfluss der Temperatur auf die Akustik vernachlässigbar ist. Basierend auf den Ergebnissen des Grundlagenexperiments wurde hinsichtlich der Erweiterung des Programmcodes für CFS++ beschlossen, keine inhomogenen Temperaturfelder bei der akustischen Schallausbreitung zu berücksichtigen. Stattdessen wurde begonnen, die Versuchsstände mit den Industriepartnern zu realisieren.

#### Modell eines elektronischen Messgerätes

In Zusammenarbeit mit der Firma Rohde & Schwarz wurde ein vereinfachtes Modell des Radio-Kommunikationstesters entwickelt, das die geometrischen Abmessungen des Originals besitzt. Die Hauptkomponenten sind hierbei, entsprechend Abb. A2.2a, der Ansaugbereich vor den Lüftern, die nachfolgenden Druckkammer, der zu kühlende Kartenbereich und das Frontpanel. Im Kartenbereich wurden durch elektronische Dummy-Baugruppen die Strömungsverhältnisse möglichst realitätsnah eingestellt. Der Aufbau wurde derart konzipiert, dass eine Großzahl an Parametern variiert werden kann. Neben unterschiedlichen Lüftertypen, ist die Größe der Druckkammer, der Typ der eingesetzten Gehäusebleche im Ansaug- und Ausstrombereich, die Schrägstellung der Lüfter beim Einblasen in die Druckkammer, die Aufhängung der Lüfter sowie weitere Parameter änderbar. Der Einfluss der Parameter auf die Schallabstrahlung wurde mittels einer halbkugelförmigen Hüllkurve aus 10 Mikrofonen erfasst. Um für die psychoakustischen Bewertungen möglichst realitätsnahe Bedingungen zu gewährleisten, wurde der Luftschall zusätzlich mit einem Kunstkopf aufgezeichnet. Die Zusammenarbeit mit Teilprojekt B1 führte zu einem umfassenden Kenntnisstand bezüglich psychoakustischer Aus- und Bewertungen. Für die Beurteilung von Gebläsen haben Untersuchungen im Rahmen des Teilprojektes B1 gezeigt, dass die Lautheit das wichtigste psychoakustisches Bewertungskriterium für Gebläse darstellt.



Abbildung A2.2: Versuchsaufbau eines vereinfachten Radio-Kommunikationstesters (Mikroelektronik)

Bei der Variation der Gehäusebleche, die aufgrund des sehr geringen Bauraums im Bereich der Mikroelektronik in der Regel in unmittelbarer Nähe zu den Lüftern platziert werden, zeigt sich, dass die Form und Anordnung der Blechperforation einen entscheidenden Einfluss auf die Entstehung akustischer Quellen besitzt. In Abb. A2.2b ist für vier unterschiedliche Blechperforationen sowohl der hüllflächengemittelte Gesamtschalldruckpegel sowie die Lautheit als psychoakustischer Parameter in Abhängigkeit des Abstandes von Gehäuseblech zum Lüfter aufgetragen. Für geringe Abstände kann durch Wahl eines symmetrisch perforierten Bleches (z. B. mit einer Wa-





Abbildung A2.3: Isoflächen des Lighthill-Quellterms im Modell des Radio-Kommunikationstesters

benstruktur) der Schalldruckpegel um bis zu 9 dB und die Lautheit um bis zu 8 sone reduziert werden. Neben diesem exemplarisch dargestellten Parameter war es aufgrund der Modularität des Aufbaus möglich, viele Einflussgrößen getrennt zu untersuchen.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden CFD-Berechnungen durchgeführt, die als Grundlage für die Berechnung der akustischen Quellterme und schließlich der akustischen Schallausbreitung dienen. Während der Gittergenerierung hat sich gezeigt, dass derart feine und komplexe Geometrien, wie sie im Bereich der Elektronik vorliegen, nur mit großem Aufwand vernetzbar sind. Eine nahezu automatisierte Vernetzung, wie sie bei einem sinnvollen Einsatz von Optimierungsalgorithmen Verwendung finden müsste, ist hier derzeit noch nicht möglich. Für die Strömungssimulation wurde ein unstrukturiertes Gitter mit ca. 40 Mio. Zellen generiert. Die instationäre Strömung wurde mit dem URANS-SST-Modell und einer Zeitschrittweite von  $10^{-4}$  s berechnet. Dies entspricht einer Winkelauflösung der rotierenden Lüfter von etwa 3°. Neben der Grundlage für die Akustiksimulation bietet die Strömungssimulation auch die Möglichkeit, die Homogenität der Durchströmung des Kartenbereichs zu beurteilen. Für den Fall einer ungleichen Durchströmung kann somit regulierend in die Strömungsführung eingegriffen und gezielt Kartenslots partiell verschlossen werden. Für die partielle Versperrung der Kartenslots sollten, wie Untersuchungen gezeigt haben, Rundloch-perforierte Bleche mit der benötigten Querschnittsverringerung anstatt unperforierter Bleche eingesetzt werden. Aus akustischer Sicht ist es besser, die gesamte Querschnittsfläche durch eine homogene, symmetrische Perforation zu reduzieren als eine Teilfäche des Querschnitts komplett zu verschließen.

Ausgehend vom Strömungsfeld der CFD-Berechnung wurden die äquivalenten Schallquellen gemäß der Lighthill-Analogie berechnet und anschließend die Schallabstrahlung mittels der Finite-Elemente-Methode simuliert. Schon die Visualisierung der Strömungsschallquellen (Abb. A2.3) lässt Rückschlüsse auf die dominanten Effekte bei der Schallerzeugung zu. Erwartungsgemäß stellen die Axiallüfter die Hauptschallquelle dar. Hier erkennt man Dipolquellen aufgrund der Schaufelkräfte und Quadrupolquellen in der turbulenten Grenzschicht des Rotors. Außerdem entsteht Schall, indem die turbulente Strömung auf die Streben trifft, die die Nabe des Lüfters halten. Dies ist auch der Fall, wenn die turbulente Strömung auf weitere Hindernisse im Nachlauf der Lüfter trifft (in diesem Fall die elektronischen Platinen des Geräts). Weitere Schallquellen finden sich an Stellen mit abrupter Querschnittsänderung, vor allem an den Blenden der Einsteckkarten, wo die Strömung aus dem Gehäuse austritt.

Darüber hinaus erlaubt es die anschließende Schallfeld-Simulation, Resonanzen im Gerät zu identifizieren, die durch den Strömungsschall angeregt werden können. Durch eine anschließende Fourier-Transformation des Schallfeldes lässt sich schnell diejenige Resonanz bestimmen, die zu einem auffälligen tonalen Anteil in der Schallabstrahlung führt. So wurde beispielsweise im untersuchten Modell eine Resonanz im Bereich des Mainboards bei 417 Hz festgestellt (Abb. A2.4a),





Abbildung A2.4: Amplitude des zeit-harmonischen Schallfeldes im Inneren des Modells eines Radio-Kommunikationstesters



Abbildung A2.5: Vergleich von berechneten und gemessenen Schalldruckpegelspektren in 1 m Entfernung vom Modell

die mit der Schaufelpassierfrequenz der Lüfter bei einer Drehzahl von 5000 min<sup>-1</sup> übereinstimmt. Gleiches gilt dementsprechend für die höheren Harmonischen (siehe beispielsweise die erste Harmonische in Abb. A2.4b). Folglich treten diese tonalen Anteile im Spektrum sehr stark gegenüber dem breitbandigen Rauschen hervor (Abb. A2.5). Die tonalen Komponenten werden durch die Simulation gut vorhergesagt, wobei die Pegel gegenüber der Messung etwas zu hoch eingeschätzt werden, bedingt durch die ideale Phasenkorrelation der Lüfter in der Simulation. Dagegen wird der breitbandige Rauschanteil von der Simulation zu niedrig bewertet.

Eine in der Simulation beobachtete Resonanz kann anschließend durch verschiedene Maßnahmen gezielt eliminiert werden. Im Experiment zeigte sich, dass Absorbermaterialien aufgrund des geringen Bauraumes wenig effektiv sind, aber zugleich den Strömungswiderstand des Systems erhöhen. Effektiver sind hier Veränderungen an der mechanischen Konstruktion, um die Resonanz an sich zu vermeiden.

#### Modell einer Umrichter-Kühlstrecke

Zusätzlich zur Betrachtung der Kühlung mikroelektronischer Baugruppen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Siemens ein Versuchsstand zur Kühlung von Leistungselektronikbaugruppen aufgebaut. Die neuartige Umrichterkühlstrecke wurde ebenfalls aus Gründen der optischen Zugänglichkeit aus Plexiglas aufgebaut. Im Gegensatz zum Versuchsaufbau des Messgerätes handelt es sich bei der Kühlstrecke des Frequenzumrichters um ein neuartiges Kühlkonzept, sodass



die durch die elektronischen Komponenten hervorgerufene Leistungseinkopplung in die Kühlkörper durch Heizpatronen (Widerstandsheizungen) simuliert wurde. Um Informationen über die Wärmeverteilung innerhalb der Strömung und der Kühlkörper zu gewinnen, wurde die gesamte Messstrecke mit über 40 Thermoelementen bestückt. In Abb. A2.6 ist die Ausgangskonfiguration der Kühlstrecke dargestellt: Die Strömung tritt von links in die Kühlstrecke. Während ein Teil durch den ersten Kühlkörper strömt, wird der Rest der Luft durch den Bypass geleitet. Hinter den Elektrolytkondensatoren treffen sich die beiden Ströme wieder und führen die Wärme des zweiten Kühlkörpers ab.



Abbildung A2.6: Versuchsaufbau der Umrichterkühlstrecke (Leistungselektronik)



Abbildung A2.7: Temperaturfelder innerhalb der Umrichterkühlstrecke

Die Leistungseinkopplung in den ersten Kühlkörper ist um den Faktor drei größer als in den zweiten Kühlkörper. Dennoch ergeben sich für die Grundkonfiguration nur geringe Temperaturunterschiede zwischen beiden Kühlkörpern. Untersuchungen mit einer Thermokamera haben gezeigt (Abb. A2.7a), dass keine ausreichende Vermischung zwischen der kalten Luft aus dem Bypass und der bereits erwärmten Luft stattfindet. Die kalte Luft erreicht lediglich die Spitzen der Finnen des zweiten Kühlkörpers und trägt somit nur in sehr geringem Maße zur Kühlung bei. Zur Verbesserung der Wärmeabfuhr, insbesondere im Bereich des zweiten Kühlkörpers, wurde die Strömungsführung innerhalb der Messstrecke verändert. Hierbei wurden unterschiedliche Konfigurationen getestet und die Kühlleistung bei verschiedenen Volumenströmen untersucht. Zusätzlich zu den thermischen Untersuchungen wurden akustische Messungen durchgeführt. Die Strömungserzeugung und -konditionierung erfolgte dabei durch ein Radialgebläse. Das Fluid strömte von dort in eine Beruhigungskammer und anschließend durch einen Pilzschalldämpfer, sodass für die akustischen Messungen ein geräuscharmer Luftstrom zur Verfügung stand. Zunächst wurde die Temperaturverteilung der Ausgangskonfiguration für unterschiedliche Volumenströme bestimmt. Beginnend bei 1320  $\frac{m^3}{h}$  wurde der Volumenstrom sukzessive reduziert. Für die beiden niedrigsten Volumenströme von 400 und 250  $\frac{m^3}{h}$  hat sich gezeigt, dass die Kühlleistung nicht genügte und die Sicherheitsabschaltung der Heizpatronen zeitweise aktiviert wurde, d. h. die eingekoppelte Wärmeleistung wurde reduziert. Eine der untersuchten Modifikationen der Strömungsführung beinhaltet die Verbesserung der Durchmischung am Ende des Bypasses durch kammartige Leitbleche. Eine sich typischerweise einstellende Temperaturverteilung innerhalb der Kühlkörper ist in Abb. A2.7b dargestellt.





Abbildung A2.8: Thermisches und akustisches Verhalten der Umrichterkühlstrecke

Die Optimierung der Strömungsführung hat dazu geführt, dass der Wärmeaustrag aus dem System verbessert wurde und die Volumenströme mit 400 und 280  $\frac{m^3}{h}$  ausreichten, um die Anlage ohne die Aktivierung der Sicherheitsabschaltung zu betreiben. Den Verlauf der durchschnittlichen Temperaturdifferenz der beiden Kühlkörper zur Umgebung für die untersuchten Konfigurationen zeigt Abb. A2.8a. Die resultierenden Schalldruckpegelspektren sind in Abb. A2.8b zu sehen. Aufgrund der Durchmischung kann der Volumenstrom auf bis zu 280  $\frac{m^3}{h}$  gesenkt und als Folge dessen der Schalldruckpegel um über 6 dB reduziert werden.

Für beide Industriepartner wurden Untersuchungen zur Geräuschreduktion der Kühlung der jeweiligen technischen Anlagen und Geräten durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen konnten den Industriepartnern Richtlinien zur Verfügung gestellt werden, die es zukünftig ermöglichen, bereits in der Entwicklungsphase der Komponenten auf akustisch ungünstige Konfigurationen hinzuweisen und geräuschärmere Luftkühlungen zu realisieren. Beispiele für die Konstruktionsrichtlinien akustisch günstiger Konfigurationen sind:

- <br/>- Einhaltung eines Mindestabstands im Nachlauf der Lüfter von mindesten<br/>s $30~\mathrm{mm}$  besser $40~\mathrm{mm}$
- Verwendung einer symmetrischen Perforation der Gehäusebleche (z. B. Wabenstruktur oder Rundloch)
- Vermeidung von abrupten Querschnittsänderungen
- Vermeidung einer asymmetrischen Lüfterzu- und -abströmung (bspw. aufgrund von Hindernissen oder der Schrägstellung der Lüfter)
- Forcierung der Durchmischung kalter und warme Luftströme, um Hotspots zu vermeiden

#### A2.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

Die Arbeiten im Teilprojekt A2 wurden mit einem Grundlagenexperiment bezüglich des Temperatureinflusses auf die akustische Schallabstrahlung begonnen. Ein beheizter Zylinder wurde mit einem geräuscharmen Luftstrom umströmt und die Veränderung der Schallausbreitung aufgrund der Temperatur untersucht. Für den im Rahmen des Projektes wichtigen Temperaturbereich bis ca. 150 °C konnte keine Beeinflussung der Schallausbreitung durch Temperaturfelder festgestellt werden. Für die Industriepartner bedeutet dies, dass bei der akustischen Auslegung von Kühlsystemen isotherme Modelle verwendet werden können, womit der experimentelle wie auch der



numerische Aufwand reduziert werden können. Die Erweiterung des Programmpakets CFS++ zur Berechnung der Akustik unter Berücksichtigung inhomogener Temperaturfelder wurde aufgrund der Ergebnisse des Grundlagenexperiments nicht durchgeführt.

Für die beteiligten Industriepartner Rohde & Schwarz sowie Siemens wurden zwei Versuchsaufbauten realisiert. Bei Rohde & Schwarz handelte es sich um ein vereinfachtes Messgerät, das die Untersuchung einer großen Zahl von Parametern zulässt. Gleichzeitig ist der Aufbau aufgrund der Konstruktion aus Plexiglas optisch zugänglich. Die Möglichkeit der Variation von Konfigurationen bringt Rohde & Schwarz den großen Vorteil, dass Einflüsse einzelner Parameter gezielt untersucht werden können. Im Vergleich zum bisher genutzten Trial-and-Error-Verfahren können zukünftig Parameter aufgrund ihres jetzt bekannten Einflusses auf die Lärmentstehung gezielt eingestellt werden. Für einige Parameter konnten, wie sie beispielhaft in Abschnitt A2.2 genannt wurden, allgemeingültige Eigenschaften abgeleitet werden, die Schalldruckpegelreduktionen von bis zu 9 dB ermöglichen und somit die Kundenwünsche des Industriepartners nach leiseren Messgeräten erfüllen. Die Konkurrenzfähigkeit der Produkte wird dadurch gestärkt. Zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen liefert die numerische Strömungsberechnung Informationen mit einer örtlichen Auflösung, wie sie experimentell nicht erreichbar sind. Durch die Simulation des gesamten Messgerätes inklusive der mit Bauteilen bestückten Karten kann sowohl die adäquate Durchströmung der einzelnen Kartenslots wie auch die Entstehung möglicher Hotspots aufgrund unzureichender Wärmeabfuhr (Abschattung durch Strömungsablösung oder Wirbelgebiete) geprüft werden. Die Strömungssimulation dient zusätzlich als Grundlage für die nachfolgende Akustiksimulation, die es erlaubt, Strömungsschallquellen und akustische Resonanzen im Gerät zu erkennen. Insgesamt muss die numerische Analyse der Schallentstehung aber wegen des hohen Arbeitsaufwandes als nicht praxistauglich für den industriellen Einsatz bewertet werden.

Die Gittergenerierung für das komplexe untersuchte Messgerät erfordert großen manuellen Aufwand, sodass eine rein automatische Gittergenerierung derzeit nicht möglich ist. Der Einsatz automatischer Optimierungsalgorithmen zur Verbesserung von beispielsweise Kühlleistung oder Akustik ist daher noch nicht möglich. Insbesondere die numerische Optimierung der akustischen Schallabstrahlung ist aufgrund der benötigten Rechenkapazitäten nur schwer realisierbar.

In Kooperation mit der Firma Siemens wurde ein Versuchsstand für die Kühlstrecke eines Frequenzumrichters konzipiert. Das neuartige Konzept des auf dem Elektromotor integrierten Frequenzumrichters konnte im Versuchsaufbau realisiert werden. Die Kühlleistung des Konzepts wurde durch aktive Einkopplung der abzuführenden Verlustleistung bei gleichzeitiger Messung der sich in Strömung und Kühlkörpern einstellenden Temperaturverteilung geprüft. Durch Optimierungen in der Strömungsführung konnten der benötigte Volumenstrom und als Folge dessen der Schalldruckpegel reduziert werden. In Abhängigkeit des benötigten Volumenstroms sind somit Pegelreduktionen von bis zu 6 dB möglich. Die Möglichkeit des integrierten Frequenzumrichters erlaubt es, bei passender Auslegung des Motorlüfters, diesen mit zu nutzen, sodass der Lüfter des Frequenzumrichters als zusätzliche akustische Quelle entfällt.

Das Teilprojekt A2 erzielte Verbesserungen der Lärmentwicklung an neu entwickelten und bereits bestehenden Kühlsystemen. Weiterhin wurden numerische Berechnungen zur Akustik für luftgekühlte, komplexe elektronische Systeme durchgeführt. Mit den vorhandenen Versuchsaufbauten ist es den Industriepartnern weiterhin möglich, neue Parameterstudien oder Optimierungen zu untersuchen.

#### A2.4. Publikationen & Patente

 MÜNSTERJOHANN, S.; BECKER, S.; GRABINGER, J.; WEISS, S.: Influence of various parameters on the noise emission of air-cooled systems with forced convection. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1953–1956. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013



# A3. Aeroakustische Schallentstehung in Ventilatoren und deren Schallabstrahlung

Beteiligte Partner:	Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, FAU Erlangen-Nürnberg
	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
	Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München
	ANSYS Germany, Otterfing
	CFDnetwork Engineering, München
	ebm-papst, Landshut
	Gardner Denver Deutschland, Bad Neustadt a. d. Saale
Projektleiter:	apl. Prof. DrIng. S. Becker, Prof. DrIng. E. Schlücker, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, FAU Erlangen-Nürnberg

#### A3.1. Ziele des Projektes

Gebläse im Allgemeinen und Radialgebläse im Besonderen sind fester Bestandteil zahlreicher technischer Anlagen. Die Lärmemission aufgrund der Strömungsvorgänge in den Gebläsen stellt eine kritische Belastung für die Personen im Umfeld dieser Maschinen dar. Daher haben Betreiber von technischen Einrichtungen großes Interesse an minimaler Schallabstrahlung von einem Gebläse. Zudem ist eine geringe Geräuschentwicklung ein Qualitätsmerkmal beim Betrieb von Radialgebläsen, weshalb damit auch ein wichtiges Verkaufsargument für die Hersteller von derartigen Gebläsen verbunden ist. Neben passiven Lärmdämmungsmaßnahmen ist die effektive Minderung bzw. Unterbindung der Schallentstehung erstrebenswert.

Daraus leitete sich das übergeordnete Ziel dieses Teilprojekts ab, den physikalischen Prozess der Geräuschentstehung in einem Radialgebläse zu untersuchen und damit die Grundlage für Veränderungen in bestehenden Radialgebläsen bzw. für konstruktive Richtlinien für die Neuauslegungen von Gebläsen unter dem Aspekt einer geringen Schallabstrahlung zu legen. Dabei lag der Fokus nicht nur auf der Analyse des Gesamtschalldruckpegels, sondern auf der Betrachtung von signifikanten tonalen und breitbandigen Schallkomponenten. Zudem wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B1 Bewertungskriterien für die psychoakustische Wahrnehmung des Gebläselärms abgeleitet.

In der Anfangsphase galt es, in Zusammenarbeit mit den beteiligten Industriepartnern den Betriebspunkt für ein geeignetes Testgebläse zu definieren und dieses Gebläse auszulegen. Zum Vergleich der Simulation der Gebläsedurchströmung sowie der darauf aufbauenden Simulation der Schallabstrahlung mit experimentell gewonnenen Daten sollte ein geeigneter Versuchsaufbau realisiert werden. Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen lag auf der Erfassung der Kennlinien des Testgebläses und der sich in verschiedenen Betriebszuständen ergebenden Schallabstrahlung.

Es wurde angestrebt, die komplexen Strömungsvorgänge in dem definierten Radialgebläse und damit die Ursache für die Geräuschentstehung anhand einer geeigneten Strömungssimulation aufzulösen. Dabei wurde Wert darauf gelegt, zu prüfen, inwieweit die Auflösung turbulenter Strukturen erforderlich bzw. mit für die industrielle Anwendung praktikablem Rechenaufwand möglich ist.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Implementierung eines hybriden Simulationsansatzes zur Berechnung der Schallquellen im rotierenden System ausgehend von den Ergebnisdaten der Strömungssimulation. Damit verbunden war die Lösung der Aufgabenstellung, die Ausbreitung des Schalls über die Schnittstelle zwischen rotierendem Gebiet und umgebendem ruhendem Fluid zu berechnen. Um dieses aufwändige Verfahren hinreichend weit zu entwickeln, zu testen



und auf das Testgebläse anzuwenden, wurde der Hinweis aus der zweiten Zwischenbegutachtung aufgegriffen und – abgesehen von generischen Testfällen – die Untersuchung auf das Laufrad ohne Spiralgehäuse beschränkt. Anhand dieser Ergebnisse wurde der Zusammenhang zwischen den Vorgängen im rotierenden Laufrad und Charakteristika in den Schalldruckspektren untersucht.

#### A3.2. Ergebnisbericht

#### Aufbau des Testgebläses und Abbildung für Strömungssimulationen

Ein wichtiger Grundsatz der durchgeführten Untersuchungen war, sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen durchzuführen und die Ergebnisse beider Ansätze miteinander zu vergleichen. Unmittelbar nach Beginn des Forschungsprojekts wurden zusammen mit den Industriepartnern ebm-papst und Gardner Denver Deutschland der Betriebspunkt und wesentliche geometrische Parameter eines geeigneten Testgebläses definiert. In Kooperation mit dem Industriepartner CFDnetwork Engineering wurde ein Radialgebläse mit Spiralgehäuse, einem Laufraddurchmesser von D = 390 mm und einer Gesamtdruckerhöhung von 1000 Pa bei einem Volumenstrom von 110 l/s im Betriebspunkt mit 2000 min<sup>-1</sup> ausgelegt. Das gefertigte Laufrad besitzt eine abnehmbare Deckscheibe, wodurch ein benachbartes Schaufelpaar gegen mit Drucksensoren bestückte Schaufeln ausgetauscht werden kann. Dadurch ist die Möglichkeit zur Erfassung instationärer Wanddrücke im rotierenden System gegeben. Das Spiralgehäuse wurde für Versuchszwecke zur Wahrung einer größtmöglichen Flexibilität modular gestaltet. Kernelement sind doppelwandige Deckscheiben, die eine rasche Veränderung von Kontur und Werkstoffdicke der Spirale erlauben. Zudem kann die Geometrie der Zunge nahezu beliebig variiert werden (siehe Abb. A3.1).

Um die Betriebspunkte für Untersuchungen am Radialgebläse reproduzierbar einstellen zu können, wurde das Testgebläse im reflexionsarmen Raum des Lehrstuhls für Prozessmaschinen und Anlagentechnik mit klassischen Elementen einer Messstrecke zur Kennlinienbestimmung kombiniert (Abb. A3.3). Stromaufwärts zum Testgebläse strömt das Fluid durch eine Messdüse (1) zur Volumenstrommessung über eine Jalousieklappe (3) zur Drosselung und ein Hilfsgebläse (4) in einen Kulissenschalldämpfer (6). Dieser Schalldämpfer mündet in eine Beruhigungskammer (9) zur Konditionierung der Zuströmung zum Gebläse (14), wobei sich alle genannten Elemente einschließlich der Kammer außerhalb des Akustikraums befinden. Für Untersuchungen mit Spiralgehäuse wird die Luft vom Druckstutzen des Radialgebläses mit einem Schlauch (19) aus dem Akustikraum geführt, der dort mit einem Rohrschalldämpfer (21) abschließt. In Kombination mit einer schalldämmenden Einhausung des Antriebsstrangs erlaubt dieser Aufbau eine Konzentration der Untersuchungen auf den vom Laufrad emittierten Schall.



Abbildung A3.1: Explosionszeichnung von Radialgebläse und modularem Gehäuse



**Abbildung A3.2:** Segment von Einlaufdüse, Laufrad und Ausstromvolumen; ohne Gehäuse



In einem Workshop mit allen beteiligten Industriepartnern, einschließlich ANSYS Germany, wurden Erfahrungswerte für die Größe des Rechengebiets ausgetauscht. Für das Laufrad ohne Spiralgehäuse empfiehlt sich demnach ein Ausstromvolumen mit einem Durchmesser von vier Laufraddurchmessern und einer axialen Ausdehnung von etwas mehr als einem Laufraddurchmesser. Bezüglich der räumlichen Diskretisierung des Rechengebiets erwies sich ein blockstrukturiertes Hexaeder-Gitter als die beste Wahl, welches in intensivem Austausch mit ANSYS Germany optimiert wurde. Um insbesondere bei skalenauflösenden Simulationen ohne Spiralgehäuse Rechenressourcen zu sparen, ist die Beschränkung der Simulation auf ein Segment sinnvoll (Abb. A3.2). Zur Bewertung einer möglichen Verfälschung der berechneten Schallabstrahlung durch die auf ein Segment reduzierte Strömungssimulation wurde zu Vergleichszwecken die Durchströmung des gesamten Laufrads mit einem radial nur wenige Millimeter ausgedehnten Ausstromgebiet simuliert.

Die Kennlinien wurden mit einer RANS-Simulation unter Verwendung des SST-Turbulenzmodells berechnet, wobei in extremen gedrosselten bzw. ungedrosselten Betriebszuständen eine URANS-Simulation die Konvergenz verbessert (siehe Abb. A3.4). Die wesentlichen Randbedingungen waren der Massenstrom am Einlass der Einlaufdüse, der Differenzdruck gegenüber der Umgebung am Auslass und die Symmetrie an periodischen Flächen. Als Grundlage für die Berechnung der Schallquellen im rotierenden System und die Simulation der Schallausbreitung wurden mindestens drei Umdrehungen des Laufrads mittels URANS und SAS simuliert. In beiden Fällen bestand das Hexaeder-Gitter des Laufradsegments aus 2,17 Mio. Zellen und das Gitter des Aussstromgebiets aus 9,9 Mio. Hexaeder-Zellen. Der Rechenaufwand für die URANS-Simulation betrug ca. 167 Stunden bei paralleler Rechnung auf 88 CPUs (14.700 CPU-Stunden), für die SAS waren ca. 1080 Stunden bei 250-facher Parallelisierung (270.000 CPU-Stunden) nötig. Abbildung A3.5 zeigt anhand einer Visualisierung der Wirbelkerne das Vermögen einer URANSbzw. einer SAS-Simulation, turbulente Strukturen aufzulösen.



Abbildung A3.3: Skizze des Versuchsaufbaus zur Einstellung der Betriebszustände



Abbildung A3.4: Vergleich der gemessenen und simulierten Kennlinien, ohne und mit Gehäuse

#### Kennlinien und Schallabstrahlung des Testgebläses

Abbildung A3.4 fasst die Ergebnisse der Kennlinienmessungen und der entsprechenden Simulationen der Gebläsedurchströmung zusammen. Ergänzend zu den Kennlinienmessungen an dem Versuchsaufbau an der Universität Erlangen-Nürnberg wurden die Kennlinien des Radialgebläses ohne und mit Gehäuse an einem saugseitigen Kammerprüfstand nach Norm bei dem Projektpartner ebm-papst vermessen. Sowohl ohne als auch mit Gehäuse stimmen die an den beiden Versuchseinrichtungen ermittelten Kennlinien gut überein, mit Abweichungen von ca. 50 Pa in der Druckerhöhung hin zu höheren Volumenströmen. Der Grund für die Abweichung wird dem für eine Kennlinienbestimmung nicht uneingeschränkt geeigneten Aufbau in Erlangen zugeschrie-



ben. Die Simulation der Kennlinie ohne Spiralgehäuse gibt den Verlauf der am Norm-Prüfstand gemessenen Kennlinie sehr gut wieder, was eine hinreichend exakte Nachbildung der Strömung im Laufrad anhand des Simulationsmodells belegt. Mit Spiralgehäuse deckt sich der simulierte Betriebspunkt gut mit dem in Erlangen gemessenen Betriebsverhalten. Für diese Konfiguration mit Gehäuse fällt in beiden gemessenen Kennlinien ein Knick für Volumenströme größer 110 l/s auf. Ohne Gehäuse zeigt sich dieser Knick allerdings nur in der Messung am Prüfstand in Erlangen und auch nicht im Simulationsergebnis, weshalb diese Auffälligkeit nicht eindeutig dem Strömungsverlauf im Gebläse zugeordnet werden konnte. Wesentlich ist, dass sich die verschiedenen Betriebszustände an dem Aufbau in Erlangen reproduzierbar einstellen lassen, wodurch eine wichtige Voraussetzung für die Untersuchungen an dem Gebläse und der Schallabstrahlung erfüllt wurde.



Abbildung A3.5: Visualisierung der Skalenauflösung durch Wirbelkerne (Q-Kriterium)

Der sequentielle Aufbau der Messstrecke verdeutlicht signifikante Eigenschaften in der Schallabstrahlung des Radialgebläses ohne Gehäuse (Abb. A3.6). Im Spektrum des frei drehenden Laufrads ohne Einlaufdüse treten Peaks bei ca. 700 Hz und 900 Hz und den entsprechenden harmonischen Frequenzen hervor. Der Anbau der Düse und der Messstrecke beeinflussen lediglich die Amplitude dieser Überhöhungen, ebenso wie Drehzahlvariationen und verschiedene Drosselzustände nur die Amplitude beeinflussen. Die Ursache für den tonalen Anteil bei 700 Hz und die folgende Schallausbreitung wurden anhand des entwickelten hybriden Simulationsverfahrens detailliert untersucht.

Mit Gehäuse ändern sich drei wesentliche Merkmale der beschriebenen Amplitudenspektren. Der Schalldruckpegel ist erwartungsgemäß mit Gehäuse deutlich reduziert, wobei das Antriebsgeräusch bei dieser Konfiguration durch ideale Spaltdichtungen am besten gedämmt wird. Weiterhin sind die beschriebenen Überhöhungen bei 700 und 900 Hz nicht mehr vorhanden, stattdessen tritt die Schaufelpassierfrequenz von 330 Hz sehr deutlich hervor. Letzteres wird in dem in Abb. A3.7 abgebildeten Betriebszustand mit schwacher Drosselung sehr gut deutlich.

#### Finite-Elemente-Verfahren zur Schallfeldberechnung

Im Bereich der numerischen Akustik wurde ein Finite-Elemente-Verfahren entwickelt, das die Berechnung der Schallausbreitung aus dem Laufrad eines Gebläses erlaubt. Das Verfahren basiert auf einer Gebietszerlegung, wobei die lineare akustische Wellengleichung innerhalb des Laufrads im rotierenden Bezugssystem gelöst wird. Außerhalb des Laufrads wird die Schallausbreitung im





**Abbildung A3.6:** Frequenzspektren des Schalldruckpegels bei sequentiellem Aufbau der Messstrecke, ohne Gehäuse



**Abbildung A3.7:** Abgestrahlter Schall ohne und mit Gehäuse, Betriebspunkt mit geringer Drosselung

ruhenden Bezugssystem berechnet. Der Austausch von Schallwellen zwischen den verschiedenen Bezugssystemen wird mittels einer sogenannten Mortar-Finite-Elemente-Methode realisiert.

Dabei werden die beiden Lösungsfunktionen des Schalldrucks (auf dem rotierenden und auf dem ruhenden Gitter) mit Hilfe eines sogenannten Lagrange-Multiplikators gekoppelt. In der bisher bekannten Mortar-Finite-Elemente-Methode für die akustische Wellengleichung wird die Stetigkeit und räumliche Differenzierbarkeit der Lösungsfunktionen an der Grenzfläche zwischen den verschiedenen Gittern sichergestellt. Durch numerische Untersuchungen in diesem Projekt konnte herausgefunden werden, dass die bekannte Mortar-Finite-Elemente-Methode in Verbindung mit der Gitterrotation im Laufrad zu Instabilitäten in der Lösung führt, die das Simulationsergebnis unbrauchbar machen. In Kooperation mit Frau Prof. Wohlmuth (TU München) konnte gezeigt werden, dass das bisher verwendete Verfahren nicht energieerhaltend arbeitet. Deshalb wurde das Verfahren entsprechend modifiziert, so dass die Energieerhaltung sichergestellt ist, was Artefakte in der Lösung vermeidet. Zu diesem Zweck mussten zusätzliche Bedingungen eingeführt werden, die die Stetigkeit der Schallschnelle und die zeitliche Differenzierbarkeit des Schalldrucks sicherstellen. Das Verfahren wurde im Detail in Beitrag [8] vorgestellt. Das beschriebene Verfahren wurde in den Finite-Elemente-Löser CFS++ integriert, der am Lehrstuhl für Sensorik in Kooperation mit der TU Wien entwickelt wird.

Zur Validierung des entwickelten Finite-Elemente-Verfahrens wurde das Schallfeld einer rotierenden Monopol-Quelle herangezogen, das sich analytisch beschreiben lässt. Um eine Referenzlösung für das Schallfeld einer rotierenden Monopol-Quelle zu erhalten, wurde ein Retarded-Time-Verfahren (RT) implementiert, das die Berechnung des Schallfeldes aus der analytischen Gleichung erlaubt. Allerdings ist dieses Schallfeld nicht exakt mit der Lösung des FE-Verfahrens vergleichbar, da hier das Medium innerhalb der Kreisbahn mit der Quelle rotiert, während im analytischen Fall das Medium ruht. Dennoch wird hier ein Vergleich der Resultate beider Methoden vorgestellt, da sich beide Fälle stark ähneln und kein besser geeigneter Referenzfall bekannt ist.

Die Parameter der Validierungsrechnung wurden an die Größen des experimentell untersuchten Radiallaufrads angepasst, um von realistischen Werten auszugehen. Die Schallquelle bewegt sich mit einer Drehzahl von 2000 min<sup>-1</sup> auf einer Kreisbahn mit Radius 0,19 m und sendet Schallwellen der Frequenz 500 Hz aus. Der ruhende Empfänger befindet sich in der Rotationsebene der Quelle, 1,0 m entfernt von der Rotationsachse. Abbildung A3.8 zeigt die von beiden Verfahren berechneten Signale, die der Empfänger während einer vollen Umdrehung der Quelle aufnimmt. Während sich die Quelle auf den Empfänger zubewegt, stimmen beide Signale gut überein. Allerdings weichen die Signale in der Amplitude deutlich voneinander ab, während sich die Quelle vom Empfänger wegbewegt. Dies ist dadurch zu erklären, dass in diesem Fall die Schallwellen im FE-Verfahren durch das bewegte Medium laufen.





**Abbildung A3.8:** Vergleich der empfangenen Signale aus RT-Verfahren und FE-Simulation



Abbildung A3.9: Zeitlicher Verlauf der Momentanfrequenz an der Quelle und am Ort des Empfängers

Ein weiteres Kriterium für die Qualität der Berechnung ist die durch den Dopplereffekt zu beobachtende Verschiebung der Momentanfrequenz. Diese lässt sich aus Sicht der Quelle analytisch berechnen. Am Ort des Empfängers lässt sich die Momentanfrequenz durch Phasendemodulation der empfangenen Signale bestimmen (siehe Abb. A3.9). Die Momentanfrequenz schwankt um die Grundfrequenz der Quelle von 500 Hz. Die Zeitverschiebung zwischen Sender und Empfänger ergibt sich durch die Laufzeit der Schallwellen. Sowohl RT- als auch FE-Verfahren bilden den Dopplereffekt sehr gut ab. Betrachtet man die Spektren der empfangenen Signale (Abb. A3.10), so ergibt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung beider Verfahren. Ausgehend von der Grundfrequenz von 500 Hz bilden sich durch die Dopplerverschiebung mehrere Spektrallinien im Abstand von 33,3 Hz, was der Rotationsfrequenz entspricht. Alle analytisch berechneten Spektrallinien treten auch in der Lösung des FE-Verfahrens auf. Die Amplituden der Spektrallinien unterscheiden sich etwas zwischen RT- und FE-Verfahren, was aufgrund der unterschiedlichen Zeitsignale aber auch zu erwarten ist. Trotz der eingeschränkten Vergleichbarkeit der beiden Fälle sind die Ergebnisse jedoch durchgängig plausibel, so dass das FE-Verfahren als erfolgreich validiert betrachtet werden kann.



**Abbildung A3.10:** Spektren der empfangenen Signale aus RT-Verfahren und FE-Simulation



Abbildung A3.11: Isoflächen des akustischen Quellterms der Finite-Elemente-Formulierung

Anschließend wurde das Verfahren auf das untersuchte Laufrad angewandt. In den Lighthill-Quelltermen (siehe Abb. A3.11), die aus dem mittels URANS simulierten Strömungsfeld berechnet wurden, erkennt man hauptsächlich Strömungsschallquellen in der Spaltströmung zwischen Einlaufdüse und Saugmund. Des Weiteren ergeben sich ebenfalls Quellen an den Schaufeleintrittskanten, wo die turbulente Spaltströmung auf die Schaufeln trifft. Diese Quellen verursachen



den tonalen Spektralanteil des abgestrahlten Schalls bei 700 Hz und dessen höheren Harmonischen. Wie eine Fourier-Transformation des Schalldrucks zeigte, entsteht bei 700 Hz eine stehende Welle, deren Wellenlänge mit dem effektiven Laufweg der Welle durch die Schaufelkanäle über den Durchmesser des Laufrads übereinstimmt. Wir haben es also mit einer Resonanz aufgrund der Laufrad-Geometrie zu tun. Die stehende Welle zeigte sich sogar in der Fourier-Transformation des aerodynamischen Drucks der URANS-Simulation (Abb. A3.12), sodass man von einer Rückwirkung der stehenden Welle auf die Strömung ausgehen muss. Man erkennt hier sowohl die stehende Welle als auch Wirbelstrukturen an den Schaufeleintrittskanten, die alle gleichzeitig ablösen. Die stehende Welle synchronisiert also die Wirbelablösung an den Schaufeleintrittskanten, wodurch sich stehende Welle und Wirbelablösung gegenseitig verstärken. Man spricht hier von einer sogenannten Parker-Mode.



**Abbildung A3.12:** Fourier-Transformierte des aerodynamischen Drucks bei 700 Hz im Radialschnitt des Laufrads



**Abbildung A3.13:** Vergleich der 1/12-Oktave-Spektren von gemessenem und berechnetem Schalldruckpegel

Da die URANS-Simulation des kompletten Laufrads jedoch nur diese eine tonale Komponente (und deren höhere Harmonische) zeigte, wurde (wie oben beschrieben) eine weitere Simulation mit höherer Zeit- und Ortsauflösung durchgeführt, wobei nur ein periodisches Segment des Aufbaus simuliert wurde, um den Rechenaufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Dieser Ansatz wurde analog auf die Finite-Elemente-Simulation übertragen. Dabei musste jedoch aufgrund der periodischen Randbedingungen auf die Rotation des Laufrads verzichtet werden. Abbildung A3.13 zeigt einen Vergleich von simuliertem und gemessenem Spektrum des Schalldrucks. Durch die verbesserte Auflösung konnten alle tonalen Komponenten bis ca. 2 kHz abgebildet werden, die auch in der Messung beobachtet wurden. Die großen Abweichungen bei Frequenzen unter 500 Hz sind ein Artefakt der diskreten Fourier-Transformation, da hierfür die insgesamt simulierte physikalische Zeit noch zu gering ist. Ab ca. 8 kHz fällt das berechnete Spektrum gegenüber der Messung stark ab, was durch die begrenzte Skalenauflösung der URANS-Simulation zu erklären ist. Um auch bei höheren Frequenzen den Schalldruckpegel korrekt abzubilden, müsste man sich der SAS bedienen. Von der Schallfeldsimulation auf Basis der SAS-Daten stehen aber leider noch nicht in ausreichender Menge Ergebnisse zur Verfügung, da diese Rechnung noch läuft. Für den industriellen Einsatz der beschriebenen Methode ist jedoch entscheidend, dass diejenigen Spektralanteile ausreichend aufgelöst werden, die den Gesamtschallpegel bestimmen. Dies kann auch durch die URANS-Simulation gewährleistet werden.

#### A3.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

In diesem Teilprojekt wurde ein Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung und ein entsprechendes Simulationsmodell zur numerischen Untersuchung der Schallentstehung und Schallabstrahlung an einem Testgebläse realisiert. Die Ergebnisse geben Einblick in die Entstehung


dominanter Schallanteile in einem Radialgebläse und bieten damit das Potenzial zur aktiven Reduzierung der Lärmemission von Radialgebläsen.

Für die Industriepartner sind die Anforderungen an eine Strömungssimulation und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Auflösung Schallpegel-bestimmender Strömungsvorgänge eine konkret umsetzbare Erkenntnis. In einer Vorstufe zu transienten Simulationen, zur Kontrolle von Gebläseauslegungen, aber auch allgemein während der Produktentwicklung ist meist die numerische Berechnung der Gebläsekennlinien erforderlich. Auch hier stellen die durchgeführten Parameterstudien hinsichtlich Gitterstruktur, Größe der Rechengebiete und Laufradsegmentierung einen wichtigen Erfahrungsschatz sowohl für die am Projekt beteiligten Software-Hersteller CFDnetwork Engineering und ANSYS Germany als auch für die Gebläsehersteller ebm-papst und Gardner Denver Deutschland dar.

Das hybride Simulationsverfahren zur Berechnung der Schallquellen und der Schallausbreitung aus dem rotierenden in das ruhende System stellt eine Neuheit dar und ermöglicht die Vorhersage der Schalldruckpegel an diskreten Aufpunkten bereits während der Entwicklung von Radialgebläsen. Die Software-Hersteller können dieses Verfahren als Erweiterung an bestehende Programmpakete anbinden. Eine wichtige Erkenntnis für die Gebläsehersteller besteht darin, dass es ausreichend ist, ein periodisches Segment eines frei ausblasenden Radiallaufrads mittels URANS zu simulieren, um den entstehenden Strömungsschall ausreichend genau vorherzusagen.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus Teilprojekt B1 wurde ein Radialgebläse des Industriepartners Gardner Denver Deutschland nach psychoakustischen Gesichtspunkten in umfangreichen Probandentests analysiert. Als Ergebnis zeigte sich, dass die durch ein Gebläse hervorgerufene Lästigkeit durch die Berechnung der Lautheit eingeordnet werden kann. In charakteristischen Schallspektren von Radialgebläsen treten gehäuft tonale Überhöhungen hervor, weshalb zusätzlich zur Lautheit die Tonhaltigkeit zu berücksichtigen ist. Eine ausgeprägte Tonhöhe kann die empfundene Lästigkeit deutlich steigern. Damit wurden allgemeingültige Kriterien erarbeitet, die eine angemessene psychoakustische Bewertung des von Radialgebläsen abgestrahlten Schalls ermöglichen.

#### A3.4. Publikationen & Patente

- [8] GRABINGER, J. ; KALTENBACHER, M. ; BECKER, S. ; LERCH, R.: Numerische Berechnung der Schallausbreitung in rotierenden Systemen mittels FEM auf nicht-konformen Gittern. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2011, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2011. – ISBN 978–3–939296–02–7, S. 139–140. – Düsseldorf, 22. - 24.03.2011
- [9] GRABINGER, J. ; KALTENBACHER, M. ; WOHLMUTH, B. I. ; LERCH, R.: Validierung eines Finite-Elemente-Verfahrens zur Berechnung der Schallausbreitung in rotierenden Systemen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296– 04–1, S. 555–556. – Darmstadt, 19. - 22.03.2012
- [10] HEINEMANN, T. ; SCHEIT, C. ; MÜLLER, S. ; SPRINGER, M. ; BECKER, S.: Implementierung einer Ffowcs Williams und Hawkings Methode für bewegte Oberflächen. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2012*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1. – Darmstadt, 19. - 22.03.2012
- [11] HEINEMANN, T.; SCHEIT, C.; SPRINGER, M.; MÜLLER, S.; BECKER, S.: Stationary and moving surface Ffowcs Williams and Hawkings computations of an isolated radial impeller. In: *Proceedings* of *Fan2012.* – Senlis (Frankreich), 18. - 20. April 2012
- [12] MÜNSTERJOHANN, S. ; BECKER, S. ; DITTMAR, R. ; GROHMANN, T.: Untersuchung der strömungsinduzierten Strukturschwingung am Gebläse. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1, S. 547–548. – Darmstadt, 19. – 22.03.2012
- [13] SCHEIT, C. ; KARIC, B. ; BECKER, S.: Effect of blade wrap angle on efficiency and noise of small radial fan impellers – A computational and experimental study. In: *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), S. 996–1010



# A4. Berechnung aerodynamischer Schallquellen gekapselter Heckrotoren

Beteiligte Partner:	Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, TU München Eurocopter Deutschland GmbH, Donauwörth
Projektleiter:	Prof. DrIng. N. A. Adams, Prof. DrIng. C. Breitsamter Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, TU München

# A4.1. Ziele des Projektes

Numerische Simulationen zur verfeinerten Erfassung der mit gekapselten Heckrotoren (Fenestron) verbundenen Schallquellen werden im industriellen Entwurfs- und Analyseprozess dringend benötigt. Das vorherrschende Strömungsfeld gestaltet sich sehr komplex, einerseits infolge der Gebläseströmung mit Rotor-/Stator-Interaktion und Interferenz mit der Einhausung und Haltevorrichtungen und andererseits durch den Zellennachlauf mit abgelöster und wirbeldominierter Strömung, welche sich je nach Flugzustand stark auf die akustischen Verhältnisse des Fenestrons auswirkt. Die Industrie ist daher in hohem Maße daran interessiert, dass für diese Problemstellung geeignete Simulationswerkzeuge untersucht und validiert werden. Die wesentliche Voraussetzung für die Berechnung der Schallabstrahlung ist die genaue Bestimmung des instationären und über einen weiten räumlichen Skalenbereich variierenden Strömungsfeldes.

Ziel dieses Teilprojektes ist daher die systematische Analyse der für die aeroakustischen Quellterme relevanten turbulenten Größen in derartig komplexen Strömungsfeldern auf Basis von verschiedenen Modellierungsansätzen. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit und Recheneffizienz unter dem Aspekt der industriellen Anwendung. Die mit dem Industriepartner für einen typischen, mittelgroßen Transporthubschrauber abgestimmten Flugzustände, nämlich ein Vorwärts- und ein Schwebeflugfall, sind so gewählt, dass sie im Hinblick auf die Fenestron-Lärmentwicklung von besonderer Bedeutung sind, jedoch der Einfluss des Hauptrotors auf das Strömungsfeld im Fenestron-Bereich gering ist und hier nicht mit berücksichtigt wird.

# A4.2. Ergebnisbericht

• neue Methoden

In den hier durchgeführten Untersuchungen werden die akustischen Verhältnisse anhand sog. "hybrider Methoden" bewertet. Bei dieser Vorgehensweise werden die im Nahfeld liegenden Schallquellen des Fenestrons mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen erfasst, während die Schallausbreitung ins Fernfeld durch akustische Analogien, hier Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) Verfahren, ermittelt wird.

Für die beiden ausgewählten Flugzustände werden zunächst zeitgenaue Strömungssimulationen mit der detaillierten Fenestron-Geometrie vorgenommen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der genauen Ermittlung und Analyse der turbulenten und instationären Strömungsfelder im Fenestron-Bereich bei stufenweiser Erhöhung des Modellierungsgrades der numerischen Simulation. Den industriell eingesetzten Berechnungsverfahren mit stationärer (RANS) und instationärer Reynolds gemittelter Navier–Stokes–Simulation (URANS) mit SST (Shear Stress Transport)–Turbulenzmodell werden daher Methoden mit höherem Modellierungsgrad, wie URANS mit SAS (Scale Adaptive Simulation) –Turbulenzmodell und DES (Detached Eddy Simulation) gegenübergestellt. Die Strömungsberechnungen werden gemäß der Kooperation im Forschungsverbund mit dem kommerziellen Strömungslöser ANSYS CFX (Version 13/14) durchgeführt.

Die Berechnung des abgestrahlten akustischen Feldes erfolgt mittels des FW–H Verfahrens (Teilprojekt A1, A3) unter Verwendung von Integrationsflächen im Fanbereich.



Bisher sind den Autoren keine Strömungssimulationen und Schallausbreitungsrechnungen für Gesamtkonfigurationen von Hubschrauberzelle mit derartig detaillierter Fenestronmodellierung bekannt, sodass aus den vorliegenden Untersuchungen eine neue numerische Datenbasis entsteht.

• durchgeführte Arbeiten

Alle definierten Meilensteine wurden gemäß dem Projektplan termingerecht erreicht.

#### 1. Vorwärtsflugzustand

#### Strömungssimulationen:

Die Strömungsberechnungen für den Vorwärtsflugfall ( $V_{\infty} = 62, 5 m/s, \alpha = -2^{\circ}, \beta = 0^{\circ}$ ) wurden auf Basis von blockstrukturierten Netzen durchgeführt, welche alle relevanten Geometriedetails abbilden, insbesondere Details der Fenestron–Geometrie. Die endgültige Topologie des Netzes umfasst ca. 3400 Blöcke mit ca. 25.5 Millionen Zellen ( $y^+ < 1$ ).

Für den Vorwärtsflugzustand wurden zwei Simulationsserien mit zwei verschiedenen Turbulenzmodellen vorgenommen, nämlich dem SST– und SAS– Turbulenzmodell. Die erste Simulationsserie erfolgte unter Verwendung des in der Industrie typischerweise verwendeten SST–Turbulenzmodells. Dabei wurden zunächst stationäre RANS-Simulationen durchgeführt, die als Startlösungen für die weiteren zeitgenauen instationären Rechnungen dienen.

Für die zweite Simulationsserie wurde eine verfeinerte Turbulenzmodellierung (SAS) angewendet, um den Einfluss der höheren Skalenauflösung auf die Erfassung der Schallquellen relativ zu den SST-basierten Ergebnissen zu bewerten. Als eine erweiterte URANS-Formulierung ermöglicht das SAS-Modell eine "LES-artige" Skalenauflösung der turbulenten Wirbelstrukturen in Bereichen großer Strömungsinstabilität, während die Strömungsfelder in relativ stabilen Bereichen durch die RANS-Formulierung mit dem SST-Modell behandelt werden. Die Umschaltung erfolgt dabei mittels der Kármán-Längenskala. Die zeitliche und räumliche Diskretisierung des SAS-Modells wurde entsprechend den Randbedingungen dieser Simulation (CFL < 1; turbulente Längenskala  $C_{DES} = \Delta x/L_t < 1$ ) festgelegt, was eine Netzverfeinerung bzw. –anpassung im Nachlaufbereich des Hubschrauberrumpfes erforderte. Zur Initialisierung der SAS-Simulationen wurden die Daten der konvergierten instationären SST-Simulation herangezogen.

Der Zeitschritt bei allen instationären Simulationen beträgt  $\Delta t_S = 47 \ \mu s$ . Dies entspricht 1° Drehung des Rotorblattes. Die Drehung des Rotors wurde hier unter Verwendung des sog. "Sliding Mesh-Verfahrens" modelliert. Die beiden Simulationsserien wurden auf den LRZ–Höchstleistungsrechnern (HLRB II/SuperMuc) durchgeführt und jeweils 15 Fanumdrehungen berechnet. Die Anwendung des SAS–Modells führt zu einer Verdoppelung der Rechenzeit gegenüber dem SST–Modell. Für die Analyse der Schallabstrahlung ins Fernfeld wurden die letzten 10 Fanumdrehungen weiterverarbeitet. Dies entspricht einer simulierten Zeit von 169, 2 ms.

Anhand der Strömungsfeldanalyse wird ein hochkomplexes, instationäres Strömungsfeld im Nachlaufgebiet des Hubschrauberrumpfes identifiziert, vgl. Abb. A4.1. Am Zellenheck löst die Strömung im Druckanstiegsgebiet der nach oben und innen gekrümmten seitlichen Bereiche ab, sodass im Nachlauf ein Wirbelpaar mit entgegengesetztem Drehsinn vorliegt. Hinzu kommt ein Wirbelpaar ausgehend von der Strömungsablösung an den Triebwerksauslässen. Diese großskaligen Strukturen und deren turbulente Anteile beaufschlagen unmittelbar den Fan–Eintrittsbereich, vgl. Abb. A4.1. Außerdem treten sowohl an der Eintrittsgeometrie als auch an der (drehenden) Rotornabe des Fenestrons ausgeprägte Ablösegebiete auf. Die hierdurch im Fan–Eintrittsbereich vorherrschende inhomogene Anströmung bewirkt eine variierende Blattbelastung und damit instationäre Luftkräfte, die zu tonaler Lärmentstehung beitragen.





**Abbildung A4.1:** Wirbelstrukturen an der Hubschrauber–Konfiguration (Q-Isoflächen:  $Q = 1000 \ 1/s^2$ , eingefärbt mit dimensionsloser Wirbelviskosität  $\mu_t/\mu$ ) sowie Strömungstopologien unmittelbar vor dem Fanbereich (dimensionslose Wirbelstärke–Verteilung:  $\omega_x \cdot l_{ref}/U_{\infty}$ ) beim Vergleich von SST– und SAS–Simulation im Vorwärtsflugzustand.

Vergleicht man die Ergebnisse aus der SAS–Simulation im Nachlaufgebiet des Zellenhecks mit den SST–Lösungen, ist eine feinere Auflösung der Wirbelstrukturen mit niedrigerem Niveau der dimensionslosen Wirbelviskosität  $\mu_t/\mu$  zu erkennen. Dagegen erfasst das SST–Modell dort nur großskalige Strukturen mit deutlich größerem  $\mu_t/\mu$ .

Die skalenauflösende Eigenschaft der SAS–Simulation ist ebenso im rotierenden Fenestron-Bereich gewährleistet, vgl. Abb. A4.2. Die Strömungsinstabilität, die infolge der Wechselwirkung zwischen der an der Rotornabe abgelösten Strömung und den (drehenden) Rotorblättern hervorgerufen wird, ist im Fall der SAS–Simulation feiner erfasst als in der Simulation mit dem SST–Modell. Die Strömungsinstabilität im Rotor-Bereich wird weiterhin in den Stator-Bereich transportiert und führt dort zu starken Fluktuationen der Feldgrößen.



**Abbildung A4.2:** Strömungsfeld in der Rotor–Stator–Stufe, dargestellt anhand der momentanen Machzahl–Verteilung Ma auf einer koaxialen zylindrischen Oberfläche bei einer Schaufelhöhe von 30 % beim Vergleich von SST– und SAS–Simulation im Vorwärtsflugzustand.





Abbildung A4.3: Schallspektren beim Vorwärtsflugzustand für die SST- und SAS-Simulation, der Beobachtungspunkt (OP) liegt auf der Fenestron-Eintrittsseite in einer Entfernung von 18 m.

#### Schallausbreitungsrechnungen:

Bei jedem dritten Simulationszeitschritt (akustischer Zeitschritt:  $\Delta t_A = 3 \cdot \Delta t_S = 141 \ \mu s \equiv 3^{\circ}$  Rotordrehung) werden die transienten Feldgrößen (Druck, Dichte und Geschwindigkeiten) gespeichert und anschließend auf halbkugelförmige Integrationsflächen, die den Fan-Ein- und -Austrittsbereich umschließen, interpoliert.

In Abbildung A4.3 sind die anhand des FW–H Verfahrens berechneten Schallspektren des Fenestrons im Vorwärtsflug dargestellt. Der Beobachtungspunkt liegt dabei auf der Fan– Einlassseite in einer Entfernung von 18 m von der Mitte des Fenestrons. Zur Reduzierung des dominanten tonalen Lärmanteils sind die Rotorblätter des Fenestrons in Umfangsrichtung ungleichmäßig angeordnet. Diese Maßnahme bewirkt eine "Verstimmung" des akustischen Systems, sodass sich die akustische Energie der bei der gleichmäßigen Blattverteilung dominanten BPF ("Blade Passing Frequency") auf mehrere Frequenzen verteilt und damit sog. Seitenbänder entstehen. Die FW–H–Ergebnisse der beiden Turbulenzmodelle geben diese Phänomene gut wieder, sodass die Frequenzen der Schalldruckspitzen der ersten Blattumlauffrequenz ( $10 \times \Omega$ ) und der Seitenbänder (sinusförmige Phasenmodulation;  $\Delta f_s = BPF \pm 2 \times \Omega$ ) mit den analytisch vorhergesagten Frequenzen sehr gut übereinstimmen. Der mit dem SAS-Modell berechnete Schalldruckpegel liegt über einen weiten Frequenzbereich höher als der des SST–Modells (v.a. in relativ hohen Frequenzbereichen), was durch die verbesserte Skalenauflösung begründet ist.

#### Vergleich mit Flugversuchsdaten:

Die Aussagekraft des hier angewendeten hybriden Ansatzes wurde anhand von Flugversuchsdaten des DLR bewertet (Feldmessungen mit insgesamt 43 Mikrofonen mit einer maximalen Entfernung von 800 m auf dem Flughafen Magdeburg–Cochstedt: P. Spiegel et al, Aeroacoustic Flight Test Data Analysis and Guidelines for Noise-Abatement-Procedure Design and Piloting, 2008). Das dabei gemessene Schallsignal enthält Lärmanteile aus allen Schallquellen am Hubschrauber, wie z.B. Lärm aus dem Hauptrotor, den Triebwerken und dem Fenestron. Der "Fenestron–Lärm" wurde daher aus dem gesamten Schallsignal mittels des "noise decomposition tool ROSI" (ECD) extrahiert, jedoch nur tonale Anteile. Dieses Signal wurde dann unter Berücksichtigung von Dopplereffekt und atmosphärischer Absorption wiederum auf eine halbkugelförmige Oberfläche (1 m Radius) am Hubschrauber projiziert, um die Richtungscharakteristik des vom Fenestron abgestrahlten Lärms zu



bewerten. Vergleicht man das FW–H Ergebnis des SAS–Turbulenzmodells und die Flugversuchsdaten, ist eine sehr gute Übereinstimmung über einen weiten Frequenzbereich (200 ~ 1200 Hz) festzustellen, während das SST–Ergebnis eine gute Übereinstimmung nur beim Fenestron dominanten BPF und den Seitenbändern (358, 4 ~ 836, 2 Hz) zeigt. Außerdem fällt die Hüllkurve für das SST-Modell bereits ab 800 Hz ab und zeigt dort eine starke Abweichung von der Mikrofonmessung, während das SAS–Ergebnis erst ab 1200 Hz abweicht.



**Abbildung A4.4:** Vergleich gemessener (Flugversuch) und berechneter Schalldruckpegel (1/3 Oktavbandfilter), links: Positionen der 43 auf dem Flughafen Magdeburg–Cochstedt verteilten Mikrofone; rechts: Schalldruckspektren für die SST–Simulation, die SAS–Simulation und die Mikrofonmessung.

#### 2. Schwebeflugzustand

#### Strömungssimulationen:

Neben dem Vorwärtsflug wird als zweiter relevanter Flugfall der Schwebeflug ( $V_{\infty} \rightarrow 0 \ m/s, \alpha = \beta = 0^{\circ}$ ) betrachtet. Dieser weist im Vergleich zum Vorwärtsflug einen deutlich größeren Rotorblattanstellwinkel auf ( $p = 26^{\circ}$ ). Eine Anpassung der Netze für den Vorwärtsflugfall ( $p = 2^{\circ}$ ) erwies sich als nicht sinnvoll, sodass infolge der im Fenestronbereich gegebenen geometrischen Komplexität die auf den Heckausleger reduzierte Konfiguration unstrukturiert neu vernetzt wurde. Für den Schwebeflugzustand wurde nur das SST-Turbulenzmodell zur Anwendung gebracht (Zeitschritt  $\Delta t_S = 141 \ \mu s \equiv 3^{\circ}$  Rotordrehung). Insgesamt wurden hier 14 Fanumdrehungen berechnet und die letzten 10 Umdrehungen ( $t_{total} = 169.2 \ ms \rightarrow \Delta f = 5,9 \ Hz$ ) für die weitere Ermittlung der Schallabstrahlung verwendet.

Das relativ homogene Strömungsfeld im Fenestron beim Schwebeflug beruht einerseits auf der homogenen Zuströmung am Fan-Eintrittsbereich und andererseits auf der fehlenden Ablösung an der Eintrittslippe und der (drehenden) Rotornabe. Die Wechselwirkung zwischen den von den Rotorblättern induzierten Nachläufen und des stromab liegenden Stators (Rotor-Stator-Interaktion) stellt das dominante strömungsakustische Phänomen beim Schwebeflug dar, vgl. Abb. A4.5.

#### Schallausbreitungsrechnungen:

Abbildung A4.5 zeigt das Schallspektrum des Vorwärtsflugs und Schwebeflugs, um die Auswirkung der Anströmsituation auf die akustische Charakteristik des Fenestrons zu untersuchen. Beim Vorwärtsflug entsteht aufgrund der turbulenten Anströmung, den Eintrittsstörungen und der dadurch vorhandenen komplexen Durchströmung des Fenestrons eine Erhöhung des Schalldruckpegels zwischen der BPF und den Seitenbänder.





Abbildung A4.5: Strömungsfelder auf einer Ebene unmittelbar vor dem Stator (dimensionslose Wirbelstärke-Verteilung:  $\omega_x \cdot l_{ref}/U_{\infty}$ ) sowie die berechneten Schalldruckspektren beim Vergleich von Vorwärtsflugzustand (SST-Turbulenzmodell) und Schwebeflugzustand (SST-Turbulenzmodell).



Abbildung A4.6: Vergleich gemessener (Flugversuchsdaten) und berechneter Schalldruckpegel beim Schwebeflug, links: Positionen der Mikrofone; rechts: Fenestron–Schmalbandspektren.

#### Vergleich mit Flugversuchsdaten:

Für den Schwebeflugzustand wurde der berechnete Schalldruckpegel mit den vom Projektpartner ECD bereitgestellten Flugversuchsdaten verglichen, vgl. A4.6. Diese Flugversuchsdaten wurden bei Mikrofonmessungen mit insgesamt 6 Mikrofonen aufgezeichnet, die auf dem Flugplatz in Donauwörth mit einem maximalen Abstand von 200 m vom Hubschrauber in einer Linie aufgestellt wurden. Um die Richtungscharakteristik des Fenestrons im Schwebeflug (Flughöhe 33 m) zu bestimmen, drehte sich der Hubschrauber dann bei den anschließenden Messungen immer um 45° im Gegenuhrzeigersinn. Wie im Vorwärtsflugfall, wurden die tonalen Anteile des Fenestron–Lärms mit Hilfe des "ROSI"–Programms extrahiert.

In Abbildung A4.6 ist das Schmalbandspektrum von Rechnung und Messung gegenübergestellt. Der Beobachtungspunkt liegt dabei auf der Fan–Auslassseite mit einem Azimutwinkel  $\psi$  von 135° und in einer Entfernung von 25 m vom Hubschrauber. Das FW–H Ergebnis des Schwebeflugs stimmt sehr gut mit den Flugversuchsdaten überein. Die ge-



ringen Frequenzabweichungen bzgl. BPF und den Seitenbändern zwischen der Messung und der Simulation liegen daran, dass die Drehzahl des Fenestrons nicht ganz identisch ist (Simulation  $\Omega_{Fan} \rightarrow 100 \%$ ; Messung  $\Omega_{Fan} \rightarrow 103, 6 \%$ ). Wie bereits für den Vorwärts-flugfall mit dem SST-Turbulenzmodell feststellt wurde, wird ebenso beim Schwebeflugfall die Abweichung zwischen der Simulation und der Messung ab ca. 900 Hz größer.

#### 3. Strömungsbeeinflussung an der Fenestron–Eintrittslippe

Die aus dem Vergleich zwischen Vorwärtsflug und Schwebeflug gewonnenen Erkenntnisse wurden für weitere Strömungssimulationen unter dem Aspekt der Minderung der Schallabstrahlung genutzt, wie zur Vermeidung der Strömungsablösung an der Eintrittslippe im Vorwärtsflugzustand. Zwei Konzepte werden dafür untersucht, zum einen die Modifikation der Eintrittslippen–Geometrie (größerer Radius zur Reduktion des Druckanstiegs) und zum anderen Grenzschichtabsaugung an der Eintrittslippe, vgl. Abb. A4.7.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden die Simulationen für beide Maßnahmen unter Verwendung eines sog. "Actuator–Disk–Model" ausgeführt. Dabei wird der Fan durch zwei Wirkscheiben modelliert, die jeweils die Rotor– und Stator–Stufe repräsentieren.

Nach mehreren iterativen Modifikationen der Eintrittslippe wurde festgestellt, dass sich die konstruktive Veränderung der Eintrittslippe aufgrund der begrenzten Räumlichkeit des Fenestrons nicht effektiv auswirkt, während die zweite Maßnahme bei geeigneter Wahl des abgesaugten Massenstroms eine ablösefreie Strömung zeigt. Die Rechnungen für die Auswirkung im Schalldruckpegel sind noch nicht abgeschlossen.



**Abbildung A4.7:** Strömungsbeeinflussung an der Fenestron–Eintrittslippe zur Unterdrückung der Ablösung und damit Minderung des Heckrotor–Lärms, dargestellt anhand des Totaldruckverhältnisses  $p_t/p_{t\infty}$  auf der Wirkscheibe und Stromlinien für die Basis–Geometrie, die modifizierte Eintrittslippe und Absaugung der Grenzschicht.

• wichtige Erkenntnisse

Die neu gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich auf die strömungsphysikalische Analyse und die Bewertung der verwendeten Simulationskette anhand von Flugversuchsdaten. Aus dem Projekt resultiert eine neue, detaillierte Datenbasis, die Ergebnisse für verschiedene Auflösungen turbulenter Skalen beinhaltet. Die Feldgrößen ermöglichen die Identifizierung und Analyse hochturbulenter Strömungsbereiche, wie sie hier z.B. in Form der Ablösegebiete an der Eintrittslippe und Rotornabe oder durch nachlaufbedingte Wirbelstrukturen im Fan-Eintrittsbereich vorliegen, und besondere Relevanz für die Schallemission haben. Ausgehend davon können Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung bzw. Geometriemodifikation im Hinblick auf eine Lärmminderung ableitet werden, die hier auf eine Unterdrückung der Strömungsablösung an der Eintrittslippe abzielt.



 Kooperationen zwischen den Projektpartnern und mit anderen Teilprojekten Neben regelmäßigen Projekttreffen mit dem Industriepartner Eurocopter zur Abstimmung der Arbeiten und Diskussion der Ergebnisse erfolgten vielfältige Kooperationen mit anderen Teilprojekten und Projektpartnern.

Die Firma ANSYS stellte die Software CFX zur Durchführung der Strömungssimulationen zur Verfügung. Details der numerischen Modellierung und Turbulenzbehandlung, Aspekte der Netzqualität, etc. sowie ausgewählte Ergebnisse wurden im Rahmen mehrerer Treffen und Workshops erörtert (z.B. Otterfing, 03.02.2012; Darmstadt, 23.03.2012; Otterfing, 28.11.2012). Weiterhin erhöhte die Firma ANSYS im April 2012 für dieses Teilprojekt die Anzahl der nutzbaren Hochleistungsrechner–Parallellizenzen.

Die Schallausbreitungsrechnungen werden mithilfe eines FW–H–Verfahrens der Universität Erlangen–Nürnberg (Teilprojekte A1, A3) vorgenommen.

Zur Bewertung der Vorhersagequalität der vorliegenden Berechnungskette (URANS & FW–H) dienen ferner Schalldruckspektren für eine "Fan–in–Wing"–Konfiguration, die in Kooperation mit BMW im BMW–Akustikwindkanal (Teilprojekt B2) ermittelt wurden (Messkampagne 1: 24.11.2010; Messkampagne 2: 20.09.2012).

Gemäß der Anregung der Gutachter fand in Kooperation mit dem Teilprojekt B1 eine psychoakustische Analyse des Vorwärtsflugzustands auf Basis des aus den Strömungssimulationen mit FW-H gewonnenen Schalldrucks statt. Die numerischen Datensätze wurden für verschiedene Beobachtungspunkte ausgewertet. Die Mitarbeiter der Teilprojekte A4 und B1 präsentierten diese Ergebnisse gemeinsam bei Eurocopter Deutschland (Ottobrunn, 16.05.2012). Außerdem wurde das Ergebnis bei der AIA-DAGA 2013 Jahrestagung [14] gemeinsam vorgestellt (Meran, 21.03.2013).

## A4.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

In diesem Teilprojekt wurden für die Konfiguration eines leichten Transporthubschraubers umfangreiche zeitgenaue Strömungssimulationen für einen Vorwärts- und einen Schwebeflugzustand durchgeführt, die besondere Relevanz für die Fenestron-Lärmabstrahlung haben. Aus den Ergebnissen resultiert ein verbessertes physikalisches Verständnis sowie eine *neue*, *detaillierte Datenbasis* für die Analyse aerodynamischer Schallquellen. Aus der Analyse des inhomogenen und instationären Strömungsfeldes (Fan-Eintrittsstörungen infolge Ablösung und Nachläufe) lassen sich Modifikationen (Geometrie bzw. Grenzschichtabsaugung) zur *Lärmminderung* ableiten. Ferner wurden für eine derartige Konfiguration erstmals *psychoakustische Analysen* auf Basis der numerischen Daten in Kooperation mit dem Teilprojekt B1 vorgenommen.

• Kooperationspartner

Für den Kooperationspartner ECD trägt das Teilprojekt ganz entscheidend dazu bei, die Fenestron–Lärmberechnung zu ermöglichen und somit das akustische Verhalten in den Entwurfsprozess mit einzubeziehen. Demzufolge können bei künftigen Projekten Entwurfsund Auslegungskriterien gezielt beeinflusst werden. Besondere Bedeutung erhält das Thema bei kleinen bis mittleren Transporthubschraubern, die bei dem vielfältigen Einsatzspektrum dieser Hubschrauber, wie Unfallrettung, Katastrophenschutz, Verkehrsüberwachung und Ähnliches, häufig Flüge über und in dicht besiedelten Gebieten durchführen. Ein leiseres Design erhöht unmittelbar die Vermarktungschancen von ECD-Hubschraubern sowie die Zahl von Flügen zu lärmsensitiven Plätzen.

• Industrie allgemein

Das Vorhaben besitzt ferner hohe Relevanz für die allgemeine industrielle Anwendung zur Analyse von Strömungslärm bei integrierten Rotoren. Die Methodik und Leistungsfähigkeit des Berechnungsverfahrens wurde z.B. auf Tagungen zur Simulation und Validierung von



Strömungsschallproblemen in der Luftfahrt, Fahrzeug- und Anlagentechnik (thematisches Netzwerk X–Noise [18, 22]) und ANSYS Nutzertreffen [19] präsentiert, bei denen Anwender aus einem breiten industriellen Spektrum teilnahmen.

• Forschungslandschaft allgemein

Im Hinblick auf die Forschungslandschaft sind die Berechnungsmethodik und die Ergebnisse des Teilprojekts durch eine ganze Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert [14–24]. Diese wurden im wissenschaftlichen Umfeld sehr gut aufgenommen, da das Vorhaben das systematische Vorgehen für eine komplexe und anwendungsnahe Problemstellung beleuchtet und die Verknüpfung von aerodynamischen und aeroakustischen bis hin zu psychoakustischen Analysen aufzeigt.

## A4.4. Publikationen & Patente

- [14] FASTL, H.; PUTNER, J.; YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.; KRÄMER, P.: Psychoacoustic Aspects of Helicopter Sounds. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1937–1940. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013
- [15] THOUAULT, N. ; BREITSAMTER, C. ; ADAMS, N. A.: Numerical Investigation of Inlet Distortion on a Wing Embedded Lift–Fan. In: AIAA Journal of Propulsion and Power 27 (2011), Nr. 1, S. 16–28
- [16] TIRAKALA, J. ; THOUAULT, N. ; BREITSAMTER, C. ; ADAMS, N. A.: Aeroacoustic Investigations of a Generic Fan-in-Wing Configuration. In: *Proceedings of Internoise 2011.* Osaka (Japan), 4. 11.09.2011
- [17] TIRAKALA, J.; THOUAULT, N.; YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.; ADAMS, N. A.: Aeroacoustic investigations of a generic fan-in-wing configuration. In: MCALPINE, A. (Hrsg.); ASTLEY, R. J. (Hrsg.): Aeroacoustics research in Europe: The CEAS-ASC report on 2011 highlights. 2012 (Journal of Sound and Vibration 331), S. 4609–4628
- [18] YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.: Aeroakustische Untersuchung des gekapselten Hubschrauberheckrotors für den Vorwärtsflugzustand. In: Workshop Simulation und Validierung bei Strömungsschallproblemen in der Luftfahrt, Fahrzeug- und Anlagentechnik, DEGA e.V., DGLR e.V., X-Noise e.V., 2011. – Berlin, 17. - 18.11.2011
- [19] YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.: Computational Aeroacoustic Investigation of a Helicopter Configuration with Ducted Tail Rotor. In: ANSYS Conference & 30th CADFEM Users' Meeting, 2012.
   Kassel, 24. 26.10.2012
- [20] YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.: Numerical Investigation of Aeroacoustic Sound Sources in Encapsulated Helicopter Tail Rotor. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1933–1936. Merano (Italien), 18. 21.03.2013
- [21] YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.: Numerical Investigation of Fenestron Noise Characteristics using a Hybrid Method. In: 62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, DGLR e.V., 2013. – Stuttgart, 10. - 12.09.2013
- YOU, J. H.; THOUAULT, N.; BREITSAMTER, C.: Computational Aeroacoustic Analysis of Encapsulated Helicopter Tail Rotor. In: 16th workshop of the Aeroacoustics Specialist Committee of CEAS, simultaneously 2nd scientific workshop of the European X-Noise EV network Aeroacoustic Installation Effects & Novel Aircraft Architectures, CEAS, X-Noise e.V., 2012. Braunschweig, 11. 12.10.2012
- [23] YOU, J. H.; THOUAULT, N.; BREITSAMTER, C.; ADAMS, N. A.: Aeroacoustic Analysis of a Helicopter Configuration with Ducted Tail Rotor. In: Proceedings of the 28th Congress of the International Council of Aerospaces Sciences, 2012. – Brisbane (Australien), 23. - 28.09.2012



[24] YOU, J. H.; THOUAULT, N.; BREITSAMTER, C.; ADAMS, N. A.: Numerical Investigation of Aeroacoustic Characteristics of a Helicopter Ducted Tail Rotor in Cruise Flight. In: *Journal of Sound and Vibration* (2013). – in Begutachtung



# B1. Klangqualitätsbezogene Übertragungspfadanalyse und -synthese

Beteiligte	Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München
Partner:	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
	Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH, Planegg bei München
Projektleiter:	Prof. DrIng. H. Fastl, AG Technische Akustik, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

# B1.1. Ziele des Projektes

Mit Hilfe der Übertragungspfadanalyse können die Beiträge einzelner Schallquellen zum Gesamtgeräusch untersucht werden. Am Beispiel eines Fahrzeugs kann so das Gesamtgeräusch in die einzelnen Beiträge der Teilschallquellen wie Motor, Räder oder Schalldämpfermündung aufgetrennt werden. Neben Messungen der Schallquellen im Betriebszustand müssen für die Analyse die Übertragungswege in einer komplexen Struktur untersucht werden. Für diese Transferpfadanalyse (TPA) ist die Untersuchung der Struktur in typischen Betriebszuständen von großer Bedeutung. Diese Methode wird Operationelle Transferpfadanalyse (OTPA) genannt.

Um die Eignung der OTPA für psychoakustische Untersuchungen zu verifizieren, muss die Methode von der Messung, über die Auswertungsalgorithmen, bis hin zur Validierung der Ergebnisse detailliert untersucht werden. Ein wichtiger Aspekt ist auch die Entwicklung eines systematischen Prozesses für Planung, Durchführung und Auswertung der OTPA Messungen, um belastbare Ergebnisse für weitere Untersuchungen zu erhalten. Dies erfordert eine Betrachtung der Messkette und die Auswahl geeigneter Sensoren für die Charakterisierung der Teilschallquellen, sowie die Bestimmung geeigneter Positionen für diese Sensoren. Anhand von Messungen auf Basis dieser grundlegenden Untersuchungen sollen die OTPA und die Transferpfadsynthese (TPS) sowie deren Parameter analysiert werden, um diese für qualitativ hochwertige Syntheseresultate zu optimieren. Dazu ist die Entwicklung geeigneter Methoden für die Ergebnisvalidierung nötig, auch um die Eignung der Ergebnisse für psychoakustische Untersuchungen zu verifizieren. Darüber hinaus ist ein wichtiger Punkt die Verfeinerung der Auflösung der Methoden für ein detailliertes Bild der einzelnen Schallquellen.

Eine weitere Aufgabe des Teilprojekts, welcher während des Projektverlaufs eine hohe Priorität zugeordnet wurde, ist die Einführung, Verbreitung und Anwendung psychoakustischer Methoden im gesamten Forschungsverbund, um die Psychoakustik als Alleinstellungsmerkmal des Gesamtprojekts hervorzuheben. Dies beinhaltet nicht nur die Verbreitung psychoakustischer Grundlagen bei den Projektpartnern, sondern auch die Identifikation psychoakustischer Problemstellungen in Kooperation mit einzelnen Teilprojekten und deren Lösung.

# B1.2. Ergebnisbericht

Im Zuge der systematischen Untersuchung der Methoden zur Übertragungspfadanalyse wurde mit den Sensoren, die zur Messung der Schallquellen verwendet werden, begonnen. Die OTPA ist nicht auf eine Messgröße für die Analyse beschränkt: für die Charakterisierung von Körperschallquellen wurden piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer gewählt, für Luftschallquellen Kondensatormikrofone. Während die Übertragungseigenschaften von Messmikrofonen ausführlich untersucht und dokumentiert sind, war die Literatur zu piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, im Hinblick auf eine weitere psychoakustische Auswertung der Signale, nicht ausreichend. Daher wurden diese in Simulationen und vor allem in Messungen in einem von der Müller-BBM GmbH (MBBM) zur Verfügung gestellten, beim Deutschen Kalibrierdienst (DKD) akkreditierten Labor untersucht. In den Simulationen wurden die Haupteinflussfaktoren auf Amplituden- und Phasenfrequenzgang untersucht und durch Messungen bestätigt. In Messungen wurden darüber hinaus harmonische Verzerrungen untersucht, für die das menschliche Gehör



besonders empfindlich ist. Für die Auswertung der Verzerrungen mussten der Standardmessaufbau um ein Laser-Interferometer erweitert und spezielle Auswertealgorithmen implementiert werden. Mit typischen Amplitudenabweichungen von weniger als  $\pm 1\%$ , Phasenabweichungen geringer  $\pm 5^{\circ}$  und harmonischen Verzerrungen kleiner 0.2%, erwiesen sich die piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer für psychoakustische Untersuchungen geeignet, was auch anhand der von Putner et al. [32] präsentierten Ergebnisse nachvollzogen werden kann.

Zur Bestimmung geeigneter Sensorpositionen für die Charakterisierung einzelner Schallquellen am Fahrzeug wurden in Zusammenarbeit mit der Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH (MBBM-VAS) zwei Messkampagnen am Außengeräuschprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik durchgeführt. Die als dominant identifizierten Quellen, wie Motor oder Räder, wurden für die Bestimmung geeigneter Sensorpositionen mit zahlreichen Sensoren bestückt. Für die systematische Planung weiterer Beitragsanalysemessungen konnten durch diese Messungen wichtige Erkenntnisse erzielt werden. Für die Auswertung mussten zunächst die Übertragungscharakteristika von allen Teilschallquellen zu den 32 Außenmikrofonen mittels OTPA bestimmt, eine TPS für jeden Pfad durchgeführt und die Ergebnisse für die Darstellung, analog zur Vorbeifahrt auf der Messstrecke, mit der simulierten Vorbeifahrt aufbereitet werden. In Abb. B1.1b ist der Vorbeifahrtpegel für die einzelnen Beiträge des linken Vorderrades dargestellt. Hier wurde festgestellt, dass die Räder an den Auflageflächen gerichtet abstrahlen, was je ein Mikrofon vor und hinter der Kontaktfläche notwendig macht. Die ermittelten Beiträge der Seitenwände der Reifen leisten nur einen sehr geringen Beitrag und können, im Sinne einer Vereinfachung der Messung, bei zukünftigen Messungen vernachlässigt werden. Zur Bestimmung des Motorbeitrags hat es sich beispielsweise als sinnvoll erwiesen, mehrere Körper- und Luftschallaufnehmer an der Quelle zu platzieren. Erste Vergleiche des gemessenen und synthetisierten Fahrzeugaußengeräuschs bestätigen die Wahl der OTPA als Analysemethode und können bei Putner und Lohrmann [33] nachgelesen werden.



(a) Positionen der vier Mikrofone zur Charakterisierung der Schallabstrahlung des Rades vorne links



(b) Schalldruckpegel einzelner Beiträge zum Fahrzeugaußengeräusch. rot: Gesamtbeitrag des Rades (alle vier Mikrofonpositionen), blau: Beiträge der unteren Mikrofone, grün: Beiträge der oberen Mikrofone, gepunktet: Beitrag des vorderen Mikrofons, gestrichelt: Beitrag des hinteren Mikrofons

Abbildung B1.1: Vorversuch zur Bestimmung geeigneter Mikrofonpositionen an einem Rad

Im weiteren Projektverlauf entstand eine Kooperation mit dem Partner BMW Group aus dem Forschungsverbund, welche einen Versuchsträger für die Projektlaufzeit, sowie Zeiten auf diversen Prüfständen zur Verfügung stellte. In Vorbereitung der Beitragsanalyse mit hoher Auflösung, wurden diverse Untersuchungen am Versuchsfahrzeug durchgeführt, um exakte Analysen möglich zu machen. Eine Voraussetzung ist die genaue Kenntnis aller Teilschallquellen am Versuchsträger. Daher wurden in einem reflexionsarmen Vollraum Schallortungsmessungen, auch



am Fahrzeugunterboden, durchgeführt. So wurde, wie in Abb. B1.2a dargestellt, bei einer Terzmittenfrequenz von 1250 Hz, der Dieselpartikelfilter als dominante Schallquelle am Versuchsfahrzeug identifiziert, welcher inzwischen bei einer überarbeiteten Version des Serienfahrzeugs gekapselt ist. Bei einer Terzmittenfrequenz von 3150 Hz, in Abb. B1.2b gezeigt, wurde die Ölwanne als potentielle Schallquelle identifiziert und in den Beitragsanalysemessungen mit einem Beschleunigungsaufnehmer charakterisiert. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Versuchen, wonach es nötig ist, für die Messung des Motors mehrere Körperund Luftschallsensoren zu verwenden.



Abbildung B1.2: Schallortung am Unterboden des Versuchsfahrzeugs bei abgenommener Motorverkleidung

Mit den Erkenntnissen aus den vorangegangen Untersuchungen konnten weitere Beitragsanalysemessungen systematisch geplant und umgesetzt werden, mit der Erwartung, für die Beurteilung der Beiträge aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Aufgrund des großen Bedarfs an Messgeräten und des benötigten Fahrzeugprüfstands war die enge Zusammenarbeit mit den Partnern der Firmen MBBM, MBBM-VAS und BMW wichtig für die Umsetzung der geplanten Messungen. Da bei der OTPA alle Quellen und Antworten zeitsvnchron erfasst werden müssen, ergeben sich für die Beitragsanalysemessungen an komplexen Strukturen, wie einem Fahrzeug, mitunter eine sehr hohe Anzahl an Messkanälen und Sensoren. Bei den durchgeführten Messungen wurden über 185 Kanäle, gespeist von Mikrofonen und Beschleunigungsaufnehmern, erfasst. Diese hohe Kanalzahl rührt auch daher, dass die Messungen sowohl für eine Beitragsanalyse des Fahrzeuginnengeräuschs, als auch für eine simulierte Vorbeifahrtsanalyse des Fahrzeugaußengeräuschs verwendet werden sollten. Durch diese Anforderungen wurde es auch erforderlich, die Messungen in einem großen reflexionsarmen Halbraum, hier mit Abmessungen von etwa 30 m auf 20 m, durchzuführen. Dieser ist mit einer Allradrolle zur Simulation verschiedener Fahrzustände ausgerüstet ist. Da ein kritischer Punkt für die Qualität der OTPA Ergebnisse die Variation der Anregungszustände im Betrieb ist, wurde die Quelle Motor durch gezielten Einsatz verschiedener Steuergeräte und die Quelle Räder durch Ausrüstung des Fahrzeugs mit Slicks oder Sommerreifen beeinflusst. Für alle Bauzustände wurden Drehzahl und Motorlast in Konstantfahrten und Hochläufen variiert, sowie simulierte Vorbeifahrtsmessungen durchgeführt. Durch die verschiedenen Bau- und Fahrzustände in Kombination mit der aufwendigen Sensorik, stehen eine Vielzahl an Messungen zur Verfügung, die ein breites Spektrum von Analysen ermöglichen.

Die Validierung der Analyseergebnisse stand bei der Auswertung des Fahrzeuginnenraumgeräuschs zunächst im Fokus. Wie in Abb. B1.3a deutlich wird, stimmen Messung und Analyse sehr gut überein. Für den Vergleich wurden die Beiträge aller Quellsensoren zu einem Innenraummikrofon berechnet, zusammengefasst und dem Messsignal dieses Mikrofons gegenübergestellt. Zusätzlich wurde auch eine neue Möglichkeit zur Validierung, durch den Vergleich verschiedener Bauzustände mit deutlich unterschiedlicher Anregung, erfolgreich genutzt, welche die Belastbar-



keit der Ergebnisse bestätigt und ausführlich von Putner et al. [31] diskutiert wird. Aus dieser Analyse kann somit auch eine Beurteilung der Beiträge der dominanten Schallquellen zum Fahrzeuginnenraumgeräusch erfolgen, wie in Abb. B1.3b dargestellt. Die dominanten Beiträge sind hier vor allem der Motor, sowie die Hinterachse in bestimmten Frequenzbereichen und die Räder, wobei deren Beitrag geringer ist, da hier ein Bauzustand mit profillosen Reifen betrachtet wird.





(a) Vergleich des gemessenen (schwarz) und des simulierten (blau) Fahrzeuginnengeräuschs

(b) Schalldruckpegel der Beiträge des Fahrzeuginnengeräuschs

Abbildung B1.3: Beitragsanalyse des Fahrzeuginnengeräuschs

Für die Analyse des Fahrzeugaußengeräuschs wurde hier ein Bauzustand mit Sommerreifen gewählt, wodurch erstmals die Validierung der Synthese eines einzelnen Beitrags möglich wurde. In Abb. B1.4b wird der simulierte Reifenbeitrag einer normalen Betriebsmessung mit einer reinen Rollgeräuschmessung im Lautheits-Tonheits-Muster verglichen. Wie bei Putner et al. [36] erläutert, wird nicht erwartet, dass die verschiedenen Zustände gleiche Werte liefern. Dennoch kann das Analyseergebnis für den Beitrag der Räder dadurch verifiziert werden. Der gehörgerechte Vergleich des gemessenen und simulierten Fahrzeugaußengeräuschs in Abb. B1.4a zeigt eine gute Übereinstimmung für niedrige Frequenzgruppen mit einer Tendenz zur Unterschätzung des Gesamtgeräuschs durch die Simulation zu höheren Frequenzgruppen. Allerdings unterscheiden sich die Gesamtlautheiten jeweils nur um etwa 10 %, was den typischen Schwankungen bei einer subjektiven Beurteilung entspricht. Eine Diskussion der einzelnen Beiträge und deren Darstellung, analog zu Abb. B1.1b, kann ebenfalls Putner et al. [36] entnommen werden.



(a) Vergleich des gemessenen (schwarz) und des simulierten (blau) Fahrzeugaußengeräuschs

(b) Vergleich des gemessenen (schwarz) und des simulierten (blau) Reifenrollgeräuschs

Abbildung B1.4: Beitragsanalyse des Fahrzeugaußengeräuschs



Durch den gezielten Einsatz vieler Sensoren in den Beitragsanalysemessungen wird bereits eine hohe Auflösung der einzelnen Schallquellen und Übertragungspfade möglich. Dennoch sollte die Schallübertragung in den Fahrzeuginnenraum, im speziellen die Beiträge einzelner Teilflächen der Karosserie, näher untersucht werden. Hierzu wurden mit speziellen Schallschnelle- und -drucksensoren Messungen zur Flächenbeitragsanalyse an der Beifahrerseite des Versuchsträgers durchgeführt. Da diese bereits 140 Messpositionen umfasst, musste die Messung in mehrere Durchgänge aufgeteilt werden, für die Schallschnelle- und -drucksensoren jeweils neu positioniert wurden. Um die Auswertung dennoch zu ermöglichen, wurde eine neue Methode der Phasensynchronisation mittels Referenzsensoren im Fahrzeuginnenraum eingehend von Putner et al. [34] untersucht und erfolgreich validiert. Vergleicht man die aus dem gemessenen Schalldruck ermittelten Beiträge mit den aus der Schallschnelle ermittelten Beiträgen in Abb. B1.5, zeigt sich, dass die dominanten Beiträge aus der Schallschnelle ermittelt werden. Ohne deutliche Fehler in das Analyseergebnis einzuführen, kann hier der Schalldruck an den Teilflächen vernachlässigt und die Menge der Messdaten sowie der Analyseaufwand nahezu halbiert werden.



Abbildung B1.5: Flächenbeitragsanalyse der Beifahrerseite des Versuchsträgers

#### Unterstützung des Forschungsverbundes

Um die Psychoakustik im Forschungsverbund zu etablieren, wurde ein Tutorium veranstaltet, bei dem den 26 Teilnehmern aus den einzelnen Teilprojekten die Grundlagen und Anwendung der Psychoakustik vermittelt wurden. Neben Hugo Fastl und Jakob Putner aus der organisierenden AG Technische Akustik, präsentierten Alfred Zeitler von BMW und Stefan Kremer von MBBM-VAS Themen aus dem Gebiet der Psychoakustik, auch aus dem Blickwinkel der Industrie. Die von MBBM-VAS zur Verfügung gestellten Räumlichkeiten und Verpflegung trugen zum Erfolg des Tutoriums, mit zahlreichen Diskussionen auch außerhalb der Vorträge, bei.

Im Rahmen einer Kooperation mit der Gardner Denver Deutschland GmbH wurden die Geräusche von Seitenkanalverdichtern in verschiedenen Ausbaustufen und Betriebszuständen nach psychoakustischen Gesichtspunkten untersucht. Bei diesen Untersuchungen standen die psychoakustische Lästigkeit sowie weitere psychoakustische Größen im Fokus, um Möglichkeiten für eine Modellierung aufzuzeigen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Treffens des Arbeitskreises Psychoakustik diskutiert. In Abb. B1.6a ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der in Hörversuchen beurteilten Lästigkeit und Lautheit erkennbar, was mit den Erwartungen übereinstimmt und den Schluss zulässt, dass die Lautheit die dominante Einflussgröße auf die Lästigkeit bei diesen Geräuschen ist. Wie sich zeigt, hat die sogenannte Ausgeprägtheit der Tonhöhe ebenfalls Einfluss auf die wahrgenommene Lästigkeit. Damit können die Geräusche von Seitenkanalverdichtern auch psychoakustisch beurteilt werden. Aus dieser Kooperation entstand auch die gemeinsame Publikation [30].





Abbildung B1.6: Ergebnisse psychoakustischer Untersuchungen für Partner im Projektverbund

In Zusammenarbeit mit Teilprojekt A4 (Berechnung aerodynamischer Schallquellen gekapselter Heckrotoren) wurden ebenfalls psychoakustische Untersuchungen durchgeführt. Die Simulationsergebnisse mussten aufgrund der kurzen Dauer der Signale für die weiteren Untersuchungen aufbereitet werden, was in der gemeinsamen Publikation mit den Kollegen vom Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik (AER) und der Eurocopter Deutschland GmbH [26] genauer beschrieben ist. Abhängig vom Winkel zum Heckrotor zeigen sich deutliche Unterschiede in der Lautheit in Abb. B1.6b. Diese wurden mit den ebenfalls auftretenden Klangfarbenunterschieden mit den Kollegen vom AER bei einem Treffen diskutiert und später den Industriepartnern von Eurocopter präsentiert.



Abbildung B1.7: Lautheits-Tonheits-Muster verschiedener Schalle der Projektpartner

Konfiguration

Bei einem weiteren ganztägigen Treffen des Arbeitskreis Psychoakustik wurden von den Teilnehmern im Vorfeld zur Verfügung gestellte Schallbeispiele psychoakustisch analysiert und die Ergebnisse diskutiert. Für die Geräusche unterschiedlicher Bauzustände eines Radiallüfters, die von der ebm-papst Landshut GmbH zur Analyse bereitgestellt wurden, zeigt sich im Lautheits-Tonheits-Muster in Abb. B1.7a, dass es nicht nur Unterschiede in der Lautheit, sondern auch in der Klangfarbe gibt. Darüber hinaus konnten mit der Rauigkeit weitere, als störend empfundene Aspekte der Geräusche abgebildet werden. Bei den vom Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik bereitgestellten Geräuschen eines Messgerätesimulators in Abb. B1.7b erkennt man, dass die Form des Luftdurchlasses in den Blechen einen großen Einfluss auf die Lautheit, aber zum Beispiel auch auf tonale Komponenten hat.



#### B1.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

Um Beiträge einzelner Teilschallquellen zu einem Gesamtgeräusch erfassen und beurteilen zu können, wurden die Methodik und Algorithmen erforscht und erweitert. Die operationelle Transferpfadanalyse, die das Kernstück der Beitragsanalyse bildet, wurde von der Sensorik bis zur Validierung der Analyseergebnisse detailliert untersucht. Die Eignung piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer für die Messungen und deren spätere Weiterverwendung konnte nach genauer Untersuchung der Übertragungseigenschaften bestätigt werden. Basierend auf den Ergebnissen zahlreicher Untersuchungen wurde ein erweitertes Konzept für eine systematische Vorgehensweise bei Planung und Durchführung von Beitragsanalysemessungen entwickelt. Angefangen bei der Auswahl der geeigneten Sensorik, umfasst es deren Positionierung, die Lokalisation der zum Gesamtgeräusch beitragenden Teilschallquellen, die Validierung der Analyseergebnisse und weitere Nachauswertungen, in Abhängigkeit vom gewünschten Ergebnis. Die Positionierung der Sensoren wurde an einem Fahrzeug untersucht, um auch bei zukünftigen Messungen als Hilfestellung bei der Charakterisierung typischer Schallquellen am Fahrzeug zu dienen. Für die Validierung der Ergebnisse der Beitragsanalyse wurden mitunter neue Möglichkeiten genutzt, die erst durch die systematische Vorgehensweise bei den Messungen möglich wurden, um die Zuverlässigkeit der Methode gezielt zu überprüfen. Durch zahlreiche Messungen konnte das Konzept der Beitragsanalyse bestätigt werden, womit sich die Methode als sinnvolles Werkzeug bei der Analyse und gezielten Änderung von Geräuschen komplexer technischer Anlagen erwiesen hat. Um die Übertragung über abstrahlende Flächen besser auflösen zu können, wurde die Methode der Flächenbeitragsanalyse untersucht. Hier wurde auch eine Methode zur Phasensynchronisation mehrerer Messungen erforscht, die es ermöglicht, diese Messungen mit geringerem Aufwand an Sensoren durchzuführen. Im Laufe des Projekts wurden bei der Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH bereits neue Funktionen im Messsystem umgesetzt. Diese umfassen die Flächenbeitragsanalyse, die Beitragsanalyse sowie Erweiterungen der operationellen Transferpfadanalyse. In zahlreichen Vorträgen und gemeinsamen Publikationen wurden die Ergebnisse bereits einem großen Publikum vorgestellt. Durch die enge Kooperation entstanden auch weitere Ideen und Veröffentlichungen, wie zum Beispiel bei der Beurteilung von Windkraftanlagen [25]. Die Anwender der Messsysteme, wie die BMW Group, können mit systematischem Vorgehen und neuen Funktionen zu belastbaren Ergebnissen kommen, die für eine effiziente Optimierung des Produktklangs wichtig sind.

Durch zahlreiche Aktivitäten auf dem Gebiet der Psychoakustik konnte den Projektpartnern aus Forschung und Industrie die Notwendigkeit der Berücksichtigung des Menschen bei der Beurteilung von Lärm näher gebracht werden. Die Grundlagen der Psychoakustik sowie deren Anwendung wurden in einem Tutorium vermittelt, und in diversen Kooperationen wurden Schalle von Mitgliedern des Forschungsverbunds untersucht. Für die Gardner Denver Deutschland GmbH wurden Schalle typischer Seitenkanalverdichter bezüglich ihrer psychoakustischen Lästigkeit beurteilt und Algorithmen gesucht, die diese Ergebnisse abbilden können. Dadurch kann die Psychoakustik bereits in der Produktentwicklung eingesetzt und für eine entsprechende Produktbewertung verwendet werden. In Zusammenarbeit mit Teilprojekt A4 wurden die Simulationsergebnisse des gekapselten Hubschrauberheckrotors beurteilt und deutliche Unterschiede in Lautheit und Klangfarbe abhängig vom Winkel zum Heckrotor festgestellt. Mit der ebm-papst Landshut GmbH wurden Lüftergeräusche analysiert und beurteilt, um Wege zu finden, den Produktklang gehörgerecht zu optimieren und diese Verbesserungen zu präsentieren. In Kooperation mit Teilprojekt A2 wurden die Geräusche eines Messgerätemodells mit psychoakustischen Methoden beurteilt, um eine Hilfestellung bei der gehörbezogenen Lärmminderung des Geräts zu geben.



#### B1.4. Publikationen & Patente

- [25] ARSIC, D. ; HUFF, J. E. ; PUTNER, J.: Efficient Evaluation of Wind Turbine Noise. In: Proceedings of Noise-Con 2013. – Denver (USA), 26. - 28.08.2013 – http://www.mmk.e-technik.tumuenchen.de/publ/pdf/13/13ars1.pdf
- [26] FASTL, H.; PUTNER, J.; YOU, J. H.; BREITSAMTER, C.; KRÄMER, P.: Psychoacoustic Aspects of Helicopter Sounds. In: Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1937–1940. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/13/13fas2.pdf
- [27] PUTNER, J.; DIVKO, C. A.; FASTL, H.; ZEITLER, A.: Dieselness of Car Noises in Different Driving Conditions. In: Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1776–1779. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/13/13put2.pdf
- [28] PUTNER, J. ; FASTL, H.: Rating the dieselness of vehicle noise using different psychoacoustic methods. In: Journal of the Acoustical Society of America 133 (2013), Nr. 5, S. 3598. http: //dx.doi.org/10.1121/1.4806659. - DOI 10.1121/1.4806659
- [29] PUTNER, J.; FASTL, H.: Rating the dieselness of vehicle noise using different psychoacoustic methods. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* 19 (2013), S. 050193. http://dx.doi.org/10. 1121/1.4799871. - DOI 10.1121/1.4799871
- [30] PUTNER, J.; FASTL, H.; DITTMAR, R.: Psychoakustische und instrumentelle Beurteilung typischer Geräusche von Gebläsen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1, S. 111–112. – Darmstadt, 19. - 22.03.2012 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/12/12put1.pdf
- [31] PUTNER, J.; FASTL, H.; LOHRMANN, M.; KALTENHAUSER, A.; ULLRICH, F.: Operational transfer path analysis predicting contributions to the vehicle interior noise for different excitations from the same sound source. In: *Proceedings of InterNoise 2012.* – New York City (USA), 19. - 22.8.2012 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/12/12put2.pdf
- [32] PUTNER, J.; GRAMS, P. B.; FASTL, H.: Nonlinear Behavior of Piezoelectric Accelerometers. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 63–64. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/13/13put1.pdf
- [33] PUTNER, J. ; LOHRMANN, M.: Beitragsanalyse des Fahrzeugaußengeräuschs bei der simulierten Vorbeifahrt unter Verwendung von Betriebsmessungen. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2011, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2011. – ISBN 978–3–939296–02–7, S. 131–132. – Düsseldorf, 22. - 24.03.2011 – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/11/11put1.pdf
- [34] PUTNER, J.; LOHRMANN, M.; FASTL, H.: Analysis of the contributions from vehicle cabin surfaces to the interior noise. In: *Proceedings of InterNoise 2013.* – Innsbruck (Österreich), 15. - 18.09.2013
   – http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/publ/pdf/13/13put7.pdf
- [35] PUTNER, J.; LOHRMANN, M.; FASTL, H.: Contribution analysis of vehicle exterior noise with operational transfer path analysis. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 133 (2013), Nr. 5, S. 3323. http://dx.doi.org/10.1121/1.4805558. - DOI 10.1121/1.4805558
- [36] PUTNER, J.; LOHRMANN, M.; FASTL, H.: Contribution analysis of vehicle exterior noise with operational transfer path analysis. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* 19 (2013), S. 040035. http://dx.doi.org/10.1121/1.4800420. - DOI 10.1121/1.4800420



# B2. Fahrgastzellenakustik - Sound Design für PKW-Innenraum

Beteiligte	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
Partner:	Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik,
	FAU Erlangen-Nürnberg
	BMW Group, München

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Lerch, Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg

## B2.1. Ziele des Projektes

Bei modernen Fahrzeugen dominiert ab ca. 120 km/h das Windgeräusch gegenüber anderen Lärmquellen wie Roll- und Motorgeräusch. Möglichst leise Windgeräusche sind so vor allem ein Qualitätsmerkmal für den Langstreckenkomfort. Eine Reduzierung des Windgeräusches in der Fahrgastzelle ist für den Automobilhersteller also äußerst interessant. So wäre es von Vorteil, das Geräusch im Innenraum eines PKWs bereits in einem frühen Entwicklungsstadium des Entstehungsprozesses zu berechnen zu können, da spätere Änderungen am Fahrzeug sehr teuer oder gar nicht mehr möglich sind. Um die Schallabstrahlung in den Innenraum des PKWs vorherzusagen, ist es zunächst nötig, die physikalischen Zusammenhänge zwischen Strömung, den angeregten Bauteilen und dem Innenraum zu verstehen. Vor allem die Anregung der Seitenscheibe durch die Strömung im Nachlauf des Seitenspiegels ist äußerst komplex, da sich hier der Oberflächendruck aus deterministischem akustischem Druck und stochastischem Strömungsdruck zusammensetzt. Es stellt sich daher das Problem der Erforschung der Schallentstehung durch die Überströmung des Windes und der Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Vorhersage des Schalldruck-pegels in der Fahrgastzelle zu einem frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses.

Die Kette der Schallentstehung beginnt mit der Umströmung des Seitenspiegels beziehungsweise der Überströmung des Seitenfensters und der A-Säule. Eine CFD-Simulation, mit der sich sowohl die hydrodynamische als auch die akustische Anregung der Seitenscheibe berechnen lässt, ist derzeit aufgrund des immensen Ressourcenbedarfs nicht in angemessener Rechenzeit zu realisieren. Aus diesem Grund scheint es das Mittel der Wahl zu sein, im Bereich der Strömungsanregung auf Messtechnik zu setzen und in Bezug auf die Simulation die Modellierung der Anregung und die Kopplung zwischen den Simulationsverfahren SEA und FEM voranzutreiben.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein generisches Fahrzeugmodell aufgebaut, um die Schallentstehungsmechanismen an einfachen Geometrien zu untersuchen. Dieses Fahrzeugmodell basiert auf dem SAE (Society of Automotive Engineers)-Körper und wurde speziell für akustische Untersuchungen angepasst.

Das erste Ziel war der Aufbau und die Anpassung dieses Fahrzeugmodells, um es als Referenz nutzen zu können. An diesem Modell konnten dann Parameterstudien durchgeführt werden, um den Einfluss der verschiedenen Geräuschquellen in Bezug auf die Innenraumakustik zu beurteilen.

Das nächste Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines Messverfahrens zur Trennung von akustischem und hydrodynamischem Druck auf überströmten Oberflächen. Zwar ist aus der Literatur bekannt, dass beide Druckkomponenten im Nachlauf des Spiegels beziehungsweise auf der Oberfläche der Seitenscheibe präsent sind, eine genaue Quantifizierung oder gar Ortung der Schallquelle war bisher nicht möglich.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Projektes war dann die Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Berechnung des strömungsinduzierten Windgeräusches in der Fahrgastzelle eines PKWs auf Basis des Oberflächendrucks auf der Seitenscheibe. Der Frequenzbereich sollte hierbei auf 1 kHz bis 10 kHz eingegrenzt werden, da im Bereich darunter aufgrund der großen Wellenlängen vorwiegend die Anregung des Unterbodens und anderer großer Baugruppen eine Rolle spielen. Da sich das Windgeräusch durch breitbandiges Rauschen beschreiben lässt und im bearbeiteten Frequenzbereich üblicherweise keine tonalen Komponenten vorhanden sind, wird das Innenge-



räusch in Frequenzbändern beschrieben. Im betrachteten Frequenzbereich bedient man sich für die Simulation des Schalldrucks innerhalb von geschlossenen Räumen üblicherweise der Statistischen Energieanalyse. Das mechanische Verhalten von Plattenstrukturen wie der Seitenscheibe hingegen wird aufgrund der im Vergleich zur akustischen Wellenlänge deutlich größeren Biegewellenlänge auch in diesem Frequenzbereich mit der Finite-Elemente-Methode simuliert. Es musste daher eine Kopplung zwischen den beiden Simulationsverfahren entwickelt werden.

#### B2.2. Ergebnisbericht

#### Aufbau und Eigenschaften des Fahrzeugmodells

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag auf der Anregung der Seitenscheibe infolge hydrodynamischer und akustischer Druckschwankungen und der resultierenden Schallabstrahlung in den PKW-Innenraum. Zur experimentellen Untersuchung dieser physikalischen Vorgänge, zur Bereitstellung von Daten für hybride Berechnungsverfahren, aber auch zur Validierung von Simulationsergebnissen wurde ein generisches Fahrzeugmodell aufgebaut. Um die Ergebnisse mit Untersuchungen anderer Forschergruppen vergleichen zu können, wurde als Außengeometrie der SAE Typ 4-Körper gewählt (Abb. B2.1). Die Fokussierung auf den Schalleintrag durch die Seitenscheibe erforderte einen komplexen Aufbau der Bewandung, der mit dem Industriepartner BMW erarbeitet wurde. Kernelement ist ein Rahmen aus Holzbalken, nahezu ausschließlich verbunden und beplankt mit Leim bzw. Silikon. Während ein dünnes Sandwichelement den Körperschalleintrag in die Rahmenstruktur dämmt, reduziert eine Kombination aus einem dicken Sandwichelement und einem Feder-Masse-System den Eintrag von Luftschall in den Innenraum. Zusätzliche Absorber minimieren die Nachhallzeit auf für PKW übliche Werte von ca. 0,1 s oberhalb von 200 Hz [44].

Die Konfiguration mit einem zum Grundkörper identischen Aufbau diente zur Überprüfung der Modelleigenschaften und als Vergleichsbasis für Parametervariationen. Alle Scheibenelemente wurden auf einen Holzrahmen aufgeklebt, der zur Vermeidung von Körperschallübertragung in einem Bett aus Dichtmasse lag. In Abb. B2.2 ist das Schalldämmmaß für Seitenscheiben aus Floatglas im Vergleich zur voll gedämmten Konfiguration dargestellt. Ab 200 Hz beträgt die Differenz zwischen der 3 mm-Glasplatte und der Referenzmessung bereits ca. 15 dB und nimmt zu hohen Frequenzen bis ca. 20 dB zu. Erwartungsgemäß ist dieser Unterschied bei der dünneren Glasplatte noch deutlicher ausgeprägt. Dämmwerte von über 30 dB ab 200 Hz für die voll gedämmte Konfiguration quantifizieren die Dämmwirkung der Modellbewandung.

Die Überströmung der Seitenscheibe wurde durch Vierkante an verschiedenen Positionen im Bereich der A-Säule, durch abstrahierte Spiegelmodelle sowie Kombination beider Hindernisse





Abbildung B2.1: Skizze des Versuchsaufbaus (Einheiten in mm)

Abbildung B2.2: Schalldämmmaß verschiedener Fensterelemente, Schalleintrag senkrecht zur Oberfläche der Seitenscheibe



gezielt beeinflusst. Während die Veränderungen an der A-Säule zweidimensionale Strömungsstrukturen induzieren, bilden sich im Nachlauf der Spiegelmodelle komplexe dreidimensionale Strömungsstrukturen aus [45]. Durch die Wahl von Spiegelmodellen mit quadratischem Querschnitt konnten periodische Wirbelablösungen erzwungen werden.

#### Messtechnische Parameterstudie

Anhand einer strukturierten Variation unterschiedlicher Modellparameter wurde die Schallabstrahlung in den Innenraum im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 10 kHz analysiert. Abbildung B2.3 fasst die signifikanten Ergebnisse für die 3 mm Glasscheibe zusammen. Ohne Hindernis weicht der Schalldruckpegel am Fahrerohr ab 1 kHz von der voll gedämmten Referenzkonfiguration ab. Sowohl der Vierkant mit 20 mm Kantenlänge an Pos. 3 im Radius der A-Säule (siehe Abb. B2.1) als auch das Spiegelmodell mit quadratischem Querschnitt und einer Kantenlänge von 80 mm haben eine deutliche Überhöhung gegenüber der Referenzmessung ab 100 Hz zur Folge. Dieses Ergebnis bei Strömungsanregung bestätigt in Kombination mit der Messung des Schalldämmmaßes (Abb. B2.2) die Eignung des Versuchsaufbaus für die Untersuchung des Schalleintrags über die Seitenscheibe.

Im Falle der Konfiguration mit dem genannten Spiegelmodell skaliert der Schalldruckpegel für Freistrahlgeschwindigkeiten von 80 bis 180 km/h am Fahrerohr ab 100 Hz ~  $U^8$  (Abb. B2.4). Insbesondere oberhalb der Koinzidenzfrequenz von 4 kHz kann dies als Beleg dafür gesehen werden, dass im Strömungsfeld induzierter Schall in das Fahrzeugmodell abgestrahlt wird. Zwischen 100 Hz und 4 kHz bedingen durch hydrodynamische Druckschwankungen angeregte Strukturschwingungen die Schallabstrahlung [46]. Das entwickelte hybride Simulationsverfahren erlaubt eine exaktere Zuordnung der Schallabstrahlung oberhalb von 1 kHz zu hydrodynamischer bzw. akustischer Anregung.

Unter 100 Hz skaliert der Schalldruckpegel ~  $U^4$  was mit der Anregung von Hohlraummoden erklärt werden kann (siehe Abb. B2.5). Wird anstelle der Skalierung der Amplitude die Frequenzachse in die Strouhal-Zahl Sr umgerechnet, fallen die Peaks bei ca. Sr = 0.115 zusammen (Abb. B2.6). Demnach kommt es bei jeder der Freistrahlgeschwindigkeiten zur Wirbelablösung an dem Spiegelmodell und folglich ist tonaler Schall am Fahrerohr wahrnehmbar.

#### Kohärenzanalyse des Oberflächendrucks

Zur Messung der Kohärenzeigenschaften des Oberflächendrucks auf der Seitenscheibe wurde ein Mikrofonarray entwickelt [42]. Damit sollte es möglich sein, akustischen und hydrodynamischen Druck auf Basis der Wellenlänge bzw. Wellenzahl getrennt voneinander zu betrachten. Wäh-



**Abbildung B2.3:** Schalldruckpegel am Fahrerohr, Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen



AbbildungB2.4:SkalierungdesSchalldruckpegelsamFahrerohr $\sim$  $U^8$ , $U_{\rm ref} = 150$  km/h; Fall mit Spiegelmodell





**Abbildung B2.5:** Skalierung des Schalldruckpegels am Fahrerohr  $\sim U^4$ ,  $U_{\rm ref} = 150$  km/h; Fall mit Spiegelmodell



**Abbildung B2.6:** Schalldruckpegel am Fahrerohr in Abhängigkeit der Freistrahlgeschwindigkeit, Fall mit Spiegelmodell

rend sich die Wellenlänge der akustischen Welle über die Schallgeschwindigkeit c mit  $\lambda_A = \frac{c}{f}$  definiert, hängt die hydrodynamische Wellenlänge von der Konvektionsgeschwindigkeit  $U_c$  ab und ist somit mit  $\lambda_c = \frac{U_c}{f}$  bei PKW-üblichen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich kleiner. Um beide Wellenzahlbereiche zu erfassen, ist eine örtlich aufgelöste simultane Messung des Drucks vonnöten. Zudem gilt es, zwei grundsätzliche Probleme zu berücksichtigen:

• Es sind sehr kleine Abstände zwischen den Mikrofonpositionen nötig

Der minimale Abstand zwischen zwei Messpunkten wird über die Wellenlänge definiert. Bei 5 kHz und einer Freistrahlgeschwindigkeit von 180 km/h beträgt die konvektive Wellenlänge des Oberflächendrucks bereits  $\lambda_c \approx 6 \text{ mm}$ . Nach Nyquist müsste der Abstand zwischen zwei Messpunkten weniger als 3 mm betragen.

#### • Ein voll besetztes Messgitter ist nicht zu realisieren

Da der Oberflächendruck örtlich abgetastet werden muss, erhöht sich die Auflösung mit der Anzahl der Messpunkte. Da das Druckfeld zweidimensional vermessen werden muss, nimmt die Anzahl der Mikrofone sogar quadratisch zu. Ein Messgitter mit 10 Mikrofonen pro Richtung bestünde bereits aus 100 Mikrofonen.

Im Projekt wurde der Ansatz verfolgt, möglichst kleine Drucksensoren zu verwenden, um die Gesamtdimensionen des Arrays klein zu halten. Wenn mit der Messfläche nur eine kleine Fläche vermessen wird, kann die Annahme getroffen werden, dass die Kohärenzeigenschaften in diesem Bereich konstant sind. Auf dieser Basis lassen sich sehr viele Messpositionen des Gitters aufgrund von Redundanz entfernen, womit man mit weniger Messpunkten eine dennoch hohe Auflösung erhält. Durch einen speziell für diese Anwendung entwickelten Optimierungsalgorithmus war es



Abbildung B2.7: Mikrofonarray mit 92 Mikrofonen und Anschlusssteckern (Rückseite)



Abbildung B2.8: Oberflächenbündige Einpassung des Mikrofonarrays in der Seitenscheibe





**Abbildung B2.9:** Normiertes Kreuzleistungsdichtespektrum an Position 6 (180 km/h, ohne Seitenspiegel)



**Abbildung B2.10:** Normiertes Kreuzleistungsdichtespektrum an Position 6 (180 km/h, mit Seitenspiegel)

möglich, die Anzahl der Messpunkte bei gleicher Auflösung von 1892 auf 92 zu reduzieren. Das Mikrofonarray vermisst eine Fläche von nur  $52 \,\mathrm{mm} \times 52 \,\mathrm{mm}$ , der minimale Abstand zwischen den Messpunkten beträgt 2 mm. Möglich ist dies durch die Verwendung von MEMS-Mikrofonen, die mittels SMD Technik auf einer Leiterplatte montiert werden (siehe Abb. B2.7).

Mit dem entwickelten Mikrofonarray wurden Messungen am Fahrzeugmodell durchgeführt [39]. Dazu wurde ein spezieller Einsatz für das Seitenfenster angefertigt, in den das Mikrofonarray an 8 verschiedenen Stellen oberflächenbündig eingesetzt werden kann. Auf Basis dieser Messungen ist es möglich, ortsaufgelöst akustischen und hydrodynamischen Druck getrennt voneinander zu quantifizieren, die Parameter der Turbulenten Grenzschicht (TBL) zu identifizieren und den Einfallswinkel der akustischen Welle zu bestimmen. Letzteres erlaubt es wiederum, den Ort des akustischen Quellgebiets durch einfache Triangulation einzugrenzen.

Die Abbildungen B2.9 und B2.10 zeigen normalisierte Kreuzleistungsdichtespektren (CPS) im dreidimensionalen Plot an der Messposition 6 (Positionen siehe Abb. B2.12). Abbildung B2.9 zeigt den Fall ohne Seitenspiegel bei 180 km/h. Deutlich zu erkennen ist eine Keule, deren Wellenzahl  $k_x$  mit steigender Frequenz zunimmt. Diese repräsentiert die TBL. Anhand des Gradienten dieser Keule lässt sich die Konvektionsgeschwindigkeit und -richtung bestimmen, auf Basis der Form lassen sich die Parameter der TBL ermitteln. In Abbildung B2.10 ist der Referenzfall mit Spiegelmodell bei 180 km/h zu sehen. Hier ist neben der veränderten Form der TBL auch eine dünne Linie in der Mitte des Spektrums bei kleinen Wellenzahlen  $k_x$  und  $k_y$  zu sehen. Diese entspricht dem akustischen Druck. Es konnte also gezeigt werden, dass akustischer Druck durch



Abbildung B2.11: Gegenüberstellung von akustischem und hydrodynamischen Oberflächendruck (1/12-Oktave-Bänder)



Abbildung B2.12: Quellenortung durch einfache Triangulation: Einfallswinkelbestimmung an verschiedenen Messpunkten





Abbildung B2.13: Ablauf des hybriden Simulationsverfahrens

Verwirbelungen am Seitenspiegel entsteht. Durch selektive inverse Fourier Transformation über die entsprechenden Wellenzahlen lassen sich die Druckspektren der zwei unterschiedlichen Komponenten voneinander trennen. Abbildung B2.11 stellt die rekonstruierten hydrodynamischen und akustischen Komponenten gegenüber. Es zeigt sich, dass an den dargestellten Positionen 6,7 und 8 eine Differenz von ca. 20 dB existiert.

Durch Bestimmung der Orientierung der akustischen Linie im Wellenzahlspektrum lässt sich ferner der Einfallswinkel bestimmen. Abbildung B2.12 zeigt, wie durch die Messung an verschiedenen Positionen durch einfache Triangulation das akustische Quellgebiet lokalisiert werden kann.

#### Hybrides Simulationsverfahren [41]

Wie zu Anfang erwähnt, baut dieses Projekt in Bezug auf Strömung und Oberflächendruck rein auf Messtechnik auf. Aus diesem Grund beginnt die Kette des Simulationsverfahrens bei der Modellierung des Oberflächendrucks. Abbildung B2.13 zeigt den Ablauf der gesamten Simulation. Grundsätzlich ist zu sagen, dass der Durchlauf zweimal erfolgen muss - einmal für akustische und einmal für hydrodynamische Anregung. Die Ergebnisse werden am Ende überlagert. Als erster Schritt wird der Oberflächendruck modelliert. Dies geschieht auf Basis der Messungen mit dem entwickelten Mikrofonarray. Im Falle von akustischer Anregung passiert dies über den extrahierten Pegel und die Phasenbeziehung  $\varphi = e^{j2\pi k_A |\vec{r}|}$  zwischen den Elementen, die sich aus der akustischen Wellenzahl  $k_A$  ergibt.  $\vec{r}$  bezeichnet hierbei den Vektor zwischen zwei Elementen. Für der statistische Anregung der TBL wird ein komplizierteres Verfahren herangezogen. Dabei wird eine Kohärenzmatrix aufgestellt, die alle Kohärenzeigenschaften zwischen den Elementen beschreibt. Durch Singular-Value-Decomposition(SVD) und die Erstellung von zufälligen Phasenbeziehungen kann durch Gewichtung der Kohärenzmatrix die Anregung berechnet werden [41].

Im zweiten Schritt wird eine Finite-Elemente-Simulation auf Basis der berechneten Druckanregung durchgeführt. Die Ausgangsgröße der Rechnung ist die Oberflächennormalenschnelle, die



Abbildung B2.14: Simulationsergebnis: 180 km/h mit Seitenspiegel



wiederum als Eingangsgröße für die anschließende Statistische Energie Analyse (SEA)-Simulation fungiert.

Abbildung B2.14 zeigt ein Simulationsergebnis für den Referenzfall 180 km/h mit Seitenspiegel. Da die Akustiksimulation mittels SEA realisiert ist, ist kein exaktes ortsaufgelöstes Ergebnis zu erwarten. Vielmehr soll das Ergebnis den mittleren Schalldruck in der Fahrgastzelle abbilden. Die gestrichelten Linien in schwarz und orange zeigen Messungen am linken Fahrerohr und einer zentralen Position in der Fahrgastzelle, diese Verläufe bilden also Minimum und Maximum des Schalldrucks. Der blaue Verlauf zeigt die Simulation basierend auf rein hydrodynamischer Anregung, die grüne Linie beschreibt das Simulationsergebnis bei rein akustischer Anregung. Die Überlagerung der Ergebnisse beider Anregungsmechanismen ist mit dem dickeren roten Verlauf gezeigt. Das Simulationsergebnis zeigt sehr gute Übereinstimmung mit der Messung und liegt fast durchgängig zwischen den Grenzen der Messung (gestrichelte Verläufe). Besonders der Verlauf des Schalldruckpegels über der Frequenz wird gut abgebildet. Es stellt sich dabei heraus, dass es für die Vorhersage des Fahrgastzellenakustik essentiell ist, akustische und hydrodynamische Anregung getrennt voneinander zu betrachten. Insbesondere die Koinzidenzüberhöhung bei akustischer Anregung ist interessant. Diese rührt daher, dass sich durch den Mitführeffekt der Strömung die Wellenlänge des akustischen Drucks verschiebt. Dadurch entsteht bei der Überlagerung der resultierenden Pegel beider Anregungsmechanismen ein breiterer Frequenzbereich bevor das Spektrum abknickt. Der so entstehende Pegelverlauf stimmt gut mit den Messungen überein.

## B2.3. Zusammenfassung & Relevanz der erzielten Ergebnisse

Für den Industriepartner stellt das entwickelte Kohärenz-Messverfahren eine Möglichkeit zur Verfügung, in Zukunft Spiegelmodelle und Fahrzeugformen in einer frühen Prototypenphase auf akustischen Schalldruck hin zu untersuchen. Dazu ist kein echtes Fahrzeug nötig, es reicht ein Formmodell. In Kombination mit dem hybriden Simulationsverfahren ist aufbauend auf Messungen mit dem Mikrofonarray auch die Berechnung der strömungsinduzierten Innenraumakustik möglich.

Mit diesem hybriden Simulationsverfahren wird dem Industriepartner ferner ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dem beispielsweise Parametervariationen durchgeführt werden können. So konnte beispielsweise festgestellt werden, dass sich mit der Entfernung des akustischen Quellgebiets von der Fensterscheibe die Koinzidenzerscheinung akustischer Anregung verändern lässt. Mit steigender Entfernung verschiebt sich die Koinzidenzfrequenz zu höheren Frequenzen und die Überhöhung wird flacher. Abbildung B2.15 zeigt diese Abhängigkeit im Spektrum. Da die Entfernung der akustischen Quelle mit der Größe des Spiegels einhergeht, ist es denkbar, derartige Parameterstudien in der Entwicklungsphase in die Formgebung neuer Spiegelmodelle einzubinden.



Abbildung B2.15: Parameterstudie zur Entfernung der akustischen Quelle von der Scheibe



Allgemein kann gesagt werden, dass der Industriepartner seinen Stand der Technik durch die Untersuchungen in Bezug auf Trennung der Anregungsmechanismen deutlich erweitern konnte.

Mit dem entwickelten Mikrofonarray wurde ein Messverfahren vorgestellt, welches in dieser Form in Bezug auf Größe und örtliche Auflösung eine Neuheit darstellt. Aufgrund der kleinen Abmessungen war es erstmals möglich, den akustischen Druck auf der Seitenscheibe an mehreren Stellen zu messen, somit den Einfallswinkel zu bestimmen und letztendlich das akustische Quellgebiet zu lokalisieren.

#### B2.4. Publikationen & Patente

- [37] GABRIEL, C.; MÜLLER, S.; GRABINGER, J.; BECKER, S.; LERCH, R.: Schnittstelle für die Verwendung von FE-Daten zur Bestimmung von SEA-Parametern in OpenSourceSEA. In: Fortschritte der Akustik DAGA 2011, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2011. ISBN 978–3–939296–02–7, S. 144–145. Düsseldorf, 22. 24.03.2011
- [38] GABRIEL, C. ; MÜLLER, S. ; GRABINGER, J. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: Simulationssätze zur Berechnung der Innenraumakustik eines generischen Fahrzeugmodells. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1, S. 917– 918. – Darmstadt, 19. - 22.03.2012
- [39] GABRIEL, C. ; MÜLLER, S. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: Measurement of the spatial coherence of surface pressure in the wake of a car's side mirror. In: AIAA Aeroacoustics Conference 2013, S. 2013–2059. – Berlin, 27. - 29.05.2013
- [40] GABRIEL, C. ; MÜLLER, S. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: Numerical Simulation Methods for Flow-Induced Structure-Borne Noise and its Radiation into the Cabin of a Simplified Car Model. In: *Proceedings of Euronoise 2012*, S. 1362–1364. – Prag, 10. - 13.06.2012
- [41] GABRIEL, C.; MÜLLER, S.; ULLRICH, F.; LERCH, R.: Prediction of flow induced noise in a generic car cabin caused by acoustic and hydrodynamic loads. In: *AIAA Journal.* in Vorbereitung
- [42] GABRIEL, C. ; MÜLLER, S. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: A new kind of sensor array for measuring spatial coherence of surface pressure on a car's side window. In: *Journal of Sound and Vibration* (2013). – akzeptiert
- [43] GABRIEL, C. ; MÜLLER, S. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: Investigations on Spatial Coherence of Surface Pressure in the Wake of a Car's Side Mirror. In: *Proceedings of the International Conference* on Acoustics AIA-DAGA 2013, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3– 939296–05–8, S. 1945–1948. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013
- [44] MÜLLER, S.; GABRIEL, C.; BECKER, S.; ULLRICH, F.: Influence of the flow-induced structureborne noise on the interior acoustics of a simplified car model. In: *Proceedings of Euronoise 2012*, S. 1358–1361. – Prag, 10. - 13.06.2012
- [45] MÜLLER, S. ; GABRIEL, C. ; BECKER, S. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R.: Flow-Induced Input of Sound to the Interior of a Simplified Car Model Depending on Various Setup Parameters. In: AIAA Aeroacoustics Conference 2013, S. 2013–2029. – Berlin, 27. - 29.05.2013
- [46] MÜLLER, S.; GABRIEL, C.; BECKER, S.; ULLRICH, F.; LERCH, R.: Flow-Induced Airborne and Structure-Borne Noise at a Simplified Car Model. In: A. DILLMANN ET AL. (Hrsg.): New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics IX. Springer, 2013. – akzeptiert
- [47] MÜLLER, S.; GABRIEL, C.; ULLRICH, F.; BECKER, S.: Einfluss des strömungsinduzierten Vibrationsschalls auf die Innenraumakustik an einem vereinfachten Fahrzeugmodell. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2012, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. – ISBN 978–3–939296–04–1, S. 919–920. – Darmstadt, 19. - 22.03.2012
- [48] MÜLLER, S. ; GABRIEL, C. ; ULLRICH, F. ; LERCH, R. ; BECKER, S.: Analysis of Flow-Induced Noise at a Simplified Car Model Depending on Various Setup Parameters. In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2013. – ISBN 978–3–939296–05–8, S. 1884–1887. – Merano (Italien), 18. - 21.03.2013



# B3. Lärmreduktion bei elektrischen Leistungstransformatoren

Beteiligte	Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg
Partner:	Siemens E T TR, Nürnberg
Projektleiter:	Prof. Dr. techn. Manfred Kaltenbacher, Prof. DrIng. R. Lerch Lehrstuhl für Sensorik, FAU Erlangen-Nürnberg

## B3.1. Ziele des Projektes

Das Teilprojekt B3 beschäftigte sich mit der Lärmreduktion bei elektrischen Leistungstransformatoren. Eine wesentliche Ursache für die Lärmentstehung sind die hierbei verwendeten Transformatorbleche, welche aufgrund von Magnetostriktion zu mechanischen Schwingungen angeregt werden und somit Schall abstrahlen. Das magnetomechanische Verhalten der geschichteten Blechpakete muss exakt aufgelöst werden, um die damit verbundenen inhomogenen Effekte abzubilden. Die exakte Modellierung der geschichteten Transformatorbleche und deren effiziente numerische Berechnung stellen dabei die zentralen Herausforderungen dar.

Die Untersuchungen dieser Blechschwingungen beinhalten dabei die messtechnische Charakterisierung der Transformatorbleche sowie die numerische Simulation des Schwingungsverhaltens von Einzelblechen und Blechpaketen. Zunächst sollte ein Materialprüfstand entwickelt werden, mit dem es möglich ist, die magnetischen sowie magnetostriktiven Materialparameter von Transformatorblechen automatisiert zu bestimmen. Weiter sollte eine verlässliche Datenbasis von Materialparametern aufgebaut werden, um das anisotrope Materialverhalten korrekt beschreiben zu können. Anschließend sollte auf Basis der gewonnen Messdaten ein Finite Elemente (FE)-Simulationsverfahren entwickelt werden, welches die numerische Berechnung des magnetostriktiven Schwingungsverhaltens der Transformatorbleche sowie das daraus entstehende Schallfeld ermöglicht. Zusätzlich sollte ein realer Transformator als Testmodell aufgebaut werden, mit dem es möglich ist, die magnetostriktiven Effekte der geschichteten Blechpakete zu analysieren und mit den berechneten Simulationsergebnissen zu vergleichen.

## B3.2. Ergebnisbericht

#### Magnetostriktions-Messplatz (Single Sheet Tester)

Zunächst wurde ein Materialprüfstand aufgebaut um die Materialparameter von Transformatorblechproben messtechnisch erfassen zu können. Diese werden als Eingabedaten für das entwickelte Materialmodell in der Simulation benötigt. Ausgangspunkt dafür war ein Single Sheet Tester (Tafelmessgerät), welcher im weiteren Verlauf modifiziert und an die speziellen Anforderungen angepasst wurde. Mit dem Aufbau ist die Bestimmung der magnetischen Polarisation in Abhängigkeit der erzeugten Feldstärke möglich. Daraus werden im zweiten Schritt dann der magnetische Fluss, die Permeabilität des Materials sowie die Magnetisierungsverluste berechnet. Der Messaufbau wurde anschließend mit Hilfe von Vergleichsmessungen in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Siemens sowie einem bereits am Lehrstuhl für Sensorik vorhandenen genormten Epsteinrahmen verifiziert.

Eine wichtige Erweiterung des Messplatzes betrifft die Entwicklung einer speziellen Hubmechanik, welche eine Höhenverstellung des oberen Joches ermöglicht. Dadurch ist gewährleistet, dass die eingelegten Probebleche an den Seiten nicht durch die Joche geklemmt sind und damit frei schwingen können, was die Voraussetzung für die Erweiterung des Aufbaus um mechanische Auslenkungsmessungen ist. In Kombination mit laseroptischer Messtechnik können dann die magnetostriktiven Blechschwingungen erfasst werden. Eine Konstruktionszeichnung des aufgebauten und erweiterten Messplatzes ist in Abb. B3.1 dargestellt. Abbildung B3.2 zeigt das magnetische und Abbildung B3.3 das mechanische Hystereseverhalten von Transformatorblechen bei einer Anregungsfrequenz von 50 Hz. Dabei wurden verschiedene Blechproben untersucht,





Abbildung B3.1: Aufgebauter Magnetostriktions-Messplatz (Single Sheet Tester).

welche in unterschiedlichen Winkeln aus der selben Blechrolle herausgeschnitten wurden. Damit zeigen die dargestellten Untersuchungen das hochgradig richtungsabhängige Materialverhalten von kornorientierten Transformatorblechen. Dieses Vorgehen ermöglicht damit die Charakterisierung der Anisotropie der Materialparameter mit Hilfe des Single Sheet Testers, welche dadurch auch in der Simulation abgebildet werden kann.



Abbildung B3.2: Winkelabhängige magnetische Hysteresekurven eines kornorientierten Transformatorbleches bei 50 Hz (Walzrichtung entspricht Winkel  $0^{\circ}$ ).



Abbildung B3.3: Winkelabhängige mechanische Schmetterlingskurven eines kornorientierten Transformatorbleches bei 50 Hz (Walzrichtung entspricht Winkel  $0^{\circ}$ ).

Die Ergebnisse zeigen, dass die magnetische Permeabilität ihr Maximum in Vorzugsrichtung der kornorientierten Bleche hat und mit steigenden Schnittwinkeln abnimmt. Die magnetostriktive Kopplung verhält sich im Vergleich dazu genau umgekehrt. Ein wichtiges Ergebnis dieser Messreihen ist hierbei die Erkenntnis über die Lage des Minimums der magnetischen sowie magnetostriktiven Kopplung bei einem Schnittwinkel von 60°. Die gewonnenen Messkurven wurden im Folgenden als Eingabeparameter für das FE-Modell zur Berechnung der magnetostriktiven Blechschwingungen verwendet.



#### Simulationsverfahren

Für die Simulation wurde im ersten Schritt eine mathematische Formulierung zur Beschreibung der Magnetostriktion entwickelt. Diese basiert auf den linearen konstitutiven Feldgleichungen der Mechanik und Magnetik und erweitert diese um die Beschreibung der nichtlinearen Hystereseeffekte [57]. Der zugrundeliegende Ansatz ist hierbei die Zerlegung der hysteresebehafteten physikalischen Größen (mechanische Verschiebung und magnetische Feldstärke) in einen reversiblen sowie einen irreversiblen Anteil. Die reversiblen Anteile werden dabei durch das lineare Modell beschrieben. Das irreversible Hystereseverhalten wird durch Hystereseoperatoren modelliert, welche mittels Preisach-Modell berechnet werden. Somit entsteht ein Materialgesetz, welches implizit alle benötigten Effekte berücksichtigt.

Abhängig von der zugrundeliegenden Formulierung des magnetischen Feldproblems können die magnetischen Feldgrößen dabei entweder über das magnetische Skalarpotential oder das magnetische Vektorpotential berechnet werden. Das Vektorpotential ermöglicht es hierbei, zusätzlich dynamische Effekte, wie z.B. Wirbelströme, zu berücksichtigen [57], während das Skalarpotential Vorteile bezüglich Effizienz und Rechenzeit besitzt.

In zuvor mit dem Single Sheet Tester durchgeführten Messungen zeigte sich, dass die charakterisierten Transformatorbleche nur eine geringe Remanenzmagnetisierung aufweisen und der Großteil der Magnetisierungsverluste aufgrund von Wirbelströmen entsteht, welche durch die Verwendung des magnetischen Vektorpotentials modelliert werden können. Weiter konnte das hochgradig anisotrope Materialverhalten (siehe Abb. B3.2 und Abb. B3.3) nachgewiesen werden, welches im Vergleich zu den Hystereseffekten dominiert. Die Änderung markanter Charakteristika, wie die der Sättigungsinduktion in Abhängigkeit der Flussrichtung (Anisotropie), dominiert hier die Änderung aufgrund der Hysterese. Aus diesem Grund wurde im zweiten Schritt eine modifizierte Formulierung implementiert, welche zusätzlich die Anisotropie der Materialparameter berücksichtigt. Das Hystereseverhalten wird dabei durch die Kombination aus nichtlinearer Berechnungsvorschrift sowie Wirbelstromverlusten beschrieben. Dazu werden die zuvor gemessenen winkelabhängigen Hysteresekurven durch nichtlineare Kommutierungskurven approximiert, wodurch man eine winkelabhängige Kennlinienschar erhält. Diese wird anschließend auf Basis eines empirischen Modells in z-Richtung (Dickenrichtung) interpoliert, da eine direkte Messung der Materialparameter in z-Richtung nach aktuellem Stand nicht möglich ist. Ergebnis ist ein dreidimensionaler Satz an Messdaten zur Beschreibung des Materialverhaltens, welcher als Eingabeparameter für die Simulation verwendet werden kann.

Ausgehend von der bekannten Vektorpotentialformulierung zur Modellierung des Wirbelstromverhaltens [57], wurde das anisotrope und nichtlineare Materialverhalten zunächst in der Magnetik implementiert. Durch die Vektorbeziehung zwischen magnetischer Induktion  $\boldsymbol{B}$  und Feldstärke  $\boldsymbol{H}$  wird das Materialverhalten wie folgt beschrieben [58]

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{H}) = B_{\varphi\theta}(H)\boldsymbol{e}_B; \ \boldsymbol{e}_B = \frac{\boldsymbol{B}}{B}.$$

In jeder Iteration des Newton-Verfahrens wird für jedes finite Element der Einheitsvektor  $\mathbf{e}_B$ berechnet, um damit die passende nichtlineare Kommutierungskurve  $B_{\varphi\theta}(H)$  zu bestimmen und auszuwerten. Dabei wird  $B_{\varphi\theta}(H)$  durch bilineare Interpolation der hinterlegten Kennlinien über die Kugelkoordinaten  $\varphi, \theta$  von  $\mathbf{e}_B$  berechnet. Wichtig für die korrekte Modellierung der magnetischen Flussverteilung in gestapelten Transformatorblechen ist hierbei die Berücksichtigung der Dickenrichtung des Flusses durch den Polarwinkel  $\theta$ , da es hier aufgrund der Stapelung, vor allem im Verzapfungsbereich, zu Flüssen in Dickenrichtung kommt. Die schließlich zu lösende partielle Differentialgleichung zur Berechnung des magnetischen Feldes ergibt sich damit zu [56]

$$\boldsymbol{\nabla} \times \nu(B_{\varphi\theta}) \boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{J}_{\mathrm{i}} - \gamma \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} ,$$

mit  $\nu(B_{\varphi\theta})$  der von  $B_{\varphi\theta}$  abhängigen magnetischen Reluktivität,  $\boldsymbol{A}$  dem magnetischen Vektorpotential (definiert über  $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{A}$ ),  $\boldsymbol{J}_{i}$  der eingeprägten Stromdichte und  $\gamma$  der elektrischen Leitfähigkeit.



Das Ergebnis dieser Simulation wird dann als Anregung für die zweite Simulation verwendet, in der die magnetostriktive Verzerrung  $S^{m}(B)$  und damit die mechanischen Schwingungen berechnet werden. Zunächst wird dazu wieder durch bilineare Interpolation über die Kugelkoordinaten  $\varphi$  und  $\theta$ , in Abhängigkeit von der magnetischen Flussrichtung  $\mathbf{e}_{B}$ , eine entsprechende magnetostriktive Kommutierungskurve berechnet. Diese wird anschließend mittels nichtlinearer Berechnungsvorschrift ausgewertet und damit die Verzerrung  $S^{m}_{\varphi\theta}(B)$  für jedes finite Element bestimmt. Der in [53] beschriebene phänomenologische Materialansatz wurde damit um die Berücksichtigung der Anisotropie erweitert. Somit ergibt sich die magnetostriktive Verzerrung  $S^{m}$  nach folgender Beziehung [58]

$$\boldsymbol{S}^{\mathrm{m}} = rac{3}{2} \left( \boldsymbol{e}_B \otimes \boldsymbol{e}_B - rac{1}{3} \boldsymbol{I} 
ight) \, S^{\mathrm{m}}_{\varphi \theta}(B) \, ,$$

wobei I die Einheitsmatrix darstellt. Die partielle Differentialgleichung der Mechanik, die schließlich gelöst wird, lautet damit

$$ho rac{\partial^2 oldsymbol{u}}{\partial t^2} - oldsymbol{\mathcal{B}}^{\mathrm{T}} \Big[ oldsymbol{c}^H \Big] oldsymbol{\mathcal{B}} oldsymbol{u} = -oldsymbol{\mathcal{B}}^{\mathrm{T}} \Big[ oldsymbol{c}^H \Big] oldsymbol{S}^{\mathrm{m}} \; ,$$

mit  $\rho$  der Dichte,  $\boldsymbol{u}$  der mechanischen Verschiebung,  $[\boldsymbol{c}^H]$  dem Elastizitätsmodul und  $\mathcal{B}^T$  dem Differentialoperator.

Mit diesem Ansatz wird die Magnetostriktion als Vorwärtskopplung der Magnetik zur Mechanik realisiert. Dadurch wird die Rückwirkung der Mechanik auf die magnetischen Materialparameter und damit auf das Magnetfeld in der Simulation vernachlässigt. Diese Rückwirkung wird jedoch hauptsächlich durch die mechanische Vorspannung bestimmt. Nachdem diese Vorspannung der Bleche auch im Magnetostriktions-Messplatz realisiert werden kann, wird dieser Effekt damit bereits bei der Messung der Materialparameter berücksichtigt. Neben den mechanischen Blechschwingungen wird in diesem zweiten Simulationsschritt auch gleichzeitig das sich ergebende Schallfeld aufgrund der mechanischen Oberflächenschwingungen berechnet. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das magnetostriktive Schwingungsverhalten aufgrund einer magnetischen Anregung sowie das dadurch entstehende Schallfeld zu berechnen. Dies geschieht unter der Berücksichtigung des anisotropen sowie nichtlinearen Materialverhaltens auf Basis der zuvor ermittelten Materialparameter.



Abbildung B3.4: Verteilung des magnetischen Flusses im Inneren der Transformatorbleche zu einem charakteristischen Zeitpunkt.

![](_page_66_Figure_10.jpeg)

Abbildung B3.5: Mechanische Verschiebung der Transformatorbleche zu einem charakteristischen Zeitpunkt und Spektrum der mechanischen Verschiebung in Dickenrichtung im Verzapfungsbereich.

Um das neue FE-Verfahren zu testen, wurde ein Simulationsmodell eines Transformatorkerns erstellt. Dieses Modell besteht aus 4 stromgespeisten Anregungsspulen und einem Magnetkern, der sich wiederum aus Transformatorblechen zusammensetzt. Es ist variabel aufgebaut, sodass die Anzahl der gestapelten Bleche<sup>2</sup> sowie die optionale Isolationsschicht frei gewählt werden können. Aus Gründen der Symmetrie konnte das Modell als Viertelmodell des realen Transformatorkerns erstellt werden. In Abb. B3.4 ist die berechnete magnetische Flussverteilung einer nichtlinearen und anisotropen Simulation in Form von Vektoren im Inneren der Transformatorbleche dargestellt. Die erkennbare Überhöhung des Flusses an der Innenkante des Verzapfungsbereiches ist hier breiter und mit wesentlich geringerer Amplitude als bei einer vergleichbaren linearen Magnetikrechnung, was das Ergebnis der korrekten Abbildung der Nichtlinearitäten sowie der Anisotropie ist. Außerdem ist in Abb. B3.5 die deformierte Geometrie der Bleche aufgrund der magnetischen Anregung sowie ein Spektrum der mechanischen Verschiebung in Dickenrichtung an einem Beobachtungspunkt im Verzapfungsbereich abgebildet. Die Ergebnisse zeigen klar die Hauptquelle der mechanischen Vibration im Verzapfungsbereich der Kernbleche. Außerdem zeigt das dargestellte Spektrum die 100 Hz Grundschwingung der Magnetostriktion (Anregungsfrequenz 50 Hz) sowie die Harmonischen, was dem charakteristischen Schwingungsverhalten von Messungen an realen Transformatorkernen entspricht. Um den Einfluss der Anisotropie zu untersuchen, wurde außerdem eine Vergleichssimulation mit isotropem Materialverhalten und ansonsten gleichen Parametern durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abb. B3.6 dargestellt, welche die Zeitsignale aller drei Komponenten der mechanischen Verschiebung an einem Beobachtungspunkt im Verzapfungsbereich zeigt. Während sich die Verschiebungen in der Blechebene (x- und y-Richtung) nur wenig unterscheiden, können große Abweichungen der Verschiebung in Dickenrichtung beobachtet werden, da hier zwischen den Amplituden der isotropen und anisotropen Simulation in etwa ein Faktor von 1000 liegt. Beim Vergleich der Spektren fällt außerdem auf, dass die isotrope Verschiebung lediglich die 100 Hz Grundfrequenz der Magnetostriktion enthält, während im anisotropen Fall die für die mechanische Schwingung charakteristischen Oberschwingungen mit abgebildet werden.

![](_page_67_Figure_3.jpeg)

Abbildung B3.6: Mechanische Verschiebung der Transformatorbleche aufgrund magnetischer Anregung bei isotroper und anisotroper Berechnung.

 $<sup>^{2}</sup>$ Die präsentierten Ergebnisse wurden aus Simulationen mit sechs gestapelten Blechen erhalten.

![](_page_68_Picture_1.jpeg)

#### **Modell-Transformator**

Um messtechnische Untersuchungen an einem realen Transformator durchzuführen, wurde ein Modell-Transformator (siehe Abb. B3.7) in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Siemens aufgebaut und in Betrieb genommen. Es handelt es sich um einen Dreiphasen-Trockentransformator, wobei der Verzapfungsbereich des Kerns in Single-Steplap-Schichtung aufgebaut ist. Der Modell-Transformator entspricht im wesentlichen Aufbau dem eines realen Leistungstransformators und eignet sich folglich für messtechnische Untersuchungen im Labor, da die Ergebnisse hier übertragbar sind. Die Anregung des Kerns erfolgte über eine Spule am linken Schenkel des Transformators mit einer Anregungsfrequenz von 50 Hz.

Zunächst wurde die mechanische Kernschwingung des Transformators mit Hilfe eines Laser-Scanning-Vibrometers (LSV) bei verschiedenen Lastzuständen untersucht. Abbildung B3.9 zeigt die gemessene Oberflächenschnelle unter Last bei einer Frequenz von 100 Hz. Die größten Schwingungsamplituden treten hierbei in den Verzapfungsbereichen des Kerns auf, wobei die Amplituden von links nach rechts laufend abnehmen, da sich der magnetische Fluss dieses parallelen Magnetkreises ungleichmäßig auf die drei Schenkel verteilt. Dennoch sind klare Überhöhungen an den inneren Ecken der Verzapfungsbereiche aufgrund der dort erhöhten Flusskonzentration zu erkennen. In Abbildung B3.10 ist das Spektrum der mechanischen Auslenkung an einem Beobachtungspunkt im Verzapfungsbereich dargestellt. Die Schwingung besteht hierbei aus der dominanten Grundschwingung von 100 Hz sowie den abklingenden Harmonischen. Ein Vergleich der Messergebnisse mit den Ergebnissen aus der Simulation zeigt damit das korrekt abgebildete charakteristische Schwingungs-Spektrum sowie die korrekte Verteilung der Schwingungs-Maxima und -Minima in der Simulation.

![](_page_68_Picture_5.jpeg)

**Abbildung B3.7:** Aufgebauter Modell-Transformator mit Anregungsspule um den linken Schenkel.

![](_page_68_Figure_7.jpeg)

**Abbildung B3.8:** Schallabstrahlung aufgrund der Kernschwingungen als Isoflächen im Nahfeld des Modell-Transformators.

Mit Hilfe eines in Teilprojekt A1 entwickelten Messsystems zur Kartierung von Schallfeldern wurde außerdem die Schallabstrahlung des Transformators erfasst und damit das entstehende Schallfeld aufgrund der Kernschwingungen visualisiert. Abbildung B3.8 zeigt das kartierte Schallfeld als Isoflächen im Nahfeld des Modell-Transformators [49]. Als Ergebnis sind die vermuteten Schallquellen im Verzapfungsbereich des Kerns hier klar erkennbar und konnten somit geortet und nachgewiesen werden.

![](_page_69_Picture_0.jpeg)

![](_page_69_Figure_2.jpeg)

**Abbildung B3.9:** LSV-Messung: Oberflächenschnelle des aufgebauten Modell-Transformators unter Last bei 100 Hz.

![](_page_69_Figure_4.jpeg)

**Abbildung B3.10:** LSV-Messung: Spektrum der mechanischen Auslenkung an einem Beobachtungspunkt im Verzapfungsbereich des aufgebauten Modell-Transformators.

## B3.3. Zusammenfassung und Relevanz der erzielten Ergebnisse

#### Magnetostriktions-Messplatz

Es wurde ein Materialprüfstand zur Charakterisierung von Transformatorblechen entwickelt. Mit diesem Magnetostriktions-Messplatz ist erstmals die kombinierte Bestimmung der magnetischen sowie magnetostriktiven Materialparameter möglich. Zusätzlich wird dabei das hochgradig anisotrope Materialverhalten erfasst, was entscheidend für die korrekte Abbildung der Kernblechschwingungen ist. Der entwickelte Messplatz ermöglicht damit, alle erforderlichen Materialdaten zu bestimmen, welche für die realitätsnahe Abbildung des magnetostriktiven Materialverhaltens in der Simulation benötigt werden. Dies unter Berücksichtigung der Anisotropie sowie der Hystereseeffekte.

#### Simulationsverfahren

Es wurde ein numerisches Berechnungsmodell auf Basis von Messdaten entwickelt, welches ermöglicht, das gekoppelte Feldproblem von Magnetik-Mechanik-Akustik zu lösen. Ausgehend von einer magnetischen Anregung können hierbei die magnetostriktiven Blechschwingungen und das daraus entstehende Schallfeld berechnet werden. Dabei wird erstmals das anisotrope sowie nichtlineare Materialverhalten magnetostriktiver Transformatorbleche berücksichtigt und damit das reale Schwingungsverhalten korrekt beschrieben. Durch den modularen Aufbau des Berechnungsprozesses ist eine effiziente numerische Berechnung der Teilprobleme mit jeweils optimierten Lösungsbedingungen möglich [51]. Weiter können jeweils die einzelnen Feldprobleme separat untersucht werden, so dass neben Verbesserungen der Schallabstrahlung beispielsweise auch Variationen zur Optimierung der magnetischen Flussverteilung (und damit der Effizienz) im Transformatorkern berechnet werden können. Das Verfahren ist übertragbar und kann auf verschiedene Problemstellungen angewendet werden wodurch kostenintensive Versuchsaufbauten reduziert werden können.

#### **Modell-Transformator**

Es wurde ein Modell-Transformator aufgebaut, der im wesentlichen Aufbau dem eines realen Leistungstransformators entspricht. Dieser eignet sich damit für messtechnische Untersuchungen im Labor sowie für den Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen aus der Simulation. Es wurden Messungen der Oberflächenschnelle (mit Hilfe des Laser-Scanning-Virbrometers) durch-

![](_page_70_Picture_1.jpeg)

geführt, um das in der Simulation abgebildete Schwingungsverhalten zu validieren. Weiter wurde die Schallabstrahlung des Transformators mit Hilfe eines in Teilprojekt A1 entwickelten Messsystems zur Kartierung von Schallfeldern erfasst und damit das entstehende Schallfeld aufgrund der Kernschwingungen visualisiert. Somit war es möglich, die vermuteten Schallquellen im Verzapfungsbereich des Kerns zu orten und nachzuweisen.

## B3.4. Publikationen & Patente

- [49] ERTL, M. ; LANDES, H.: Schallmessungen im akustischen Nahfeld von Transformatoren eine numerische Analyse. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 2012*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012. ISBN 978–3–939296–04–1, S. 929–930. Darmstadt, 19. 22.03.2012
- [50] HAUCK, Andreas ; ERTL, Michael ; SCHÖBERL, Joachim ; KALTENBACHER, Manfred: Accurate magnetostatic simulation of step-lap joints in transformer cores using anisotropic higher order FEM. In: 15th International IGTE Symposium, 2012. – Graz, Austria, 16. - 19.09.2012
- [51] HAUCK, Andreas ; ERTL, Michael ; SCHÖBERL, Joachim ; KALTENBACHER, Manfred: Accurate magnetostatic simulation of step-lap joints in transformer cores using anisotropic higher order FEM. In: COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 32 (2013), Nr. 5
- [52] KALTENBACHER, M.; KALTENBACHER, B.; BAUMGARTINGER, W.: Efficient Finite Element Scheme for Electromagnetic Devices with Hysteretic Behavior. In: 14th International IGTE Symposium, 2010. – Graz, Austria, 19. - 22.09.2010
- [53] KALTENBACHER, M. ; MEILER, M. ; ERTL, M.: Physical modeling and numerical computation of magnetostriction. In: COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 28 (2009), Nr. 4, S. 819–832
- [54] KALTENBACHER, M. ; SCHRÖDER, J..: Minisymposium on Smart materials: models and numerical computation. In: 82nd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 2011. – Graz, Austria, 18. - 21.04.2011
- [55] KALTENBACHER, M.; VOLK, A.; ERTL, M.: Anisotropic Model for the Numerical Computation of Magnetostriction in Steel Sheets. In: 15th International IGTE Symposium, 2012. – Graz, Austria, 16. - 19.9.2012
- [56] KALTENBACHER, Manfred; VOLK, Adrian; ERTL, Michael: Anisotropic model for the numerical computation of magnetostriction in grain-oriented electrical steel sheets. In: COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 32 (2013), Nr. 5
- [57] VOLK, A.; KALTENBACHER, M.; HAUCK, A.; ERTL, M.; LERCH, R.: Finite Element Scheme based on Magnetic Vector Potential and Mechanical Displacement for Modeling Magnetostriction. In: Proceedings of the 8th International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM), 2011. – ISBN 978–1–84919–468–6, S. 126–127. – Wroclaw (Polen), 11. - 14.04.2011
- [58] VOLK, A.; KALTENBACHER, M.; SUTOR, A.; ERTL, M.; LERCH, R.: 3D Anisotropic Model for the Numerical Computation of Nonlinear Magnetostriction. In: Proceedings of the 19th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2013. – Budapest (Ungarn), 30.06. -04.07.2013

# A. Anhang

# A.1. Promotionen

Folgende Promotionen wurden im Rahmen des Forschungsverbundes begonnen und befinden sich kurz vor dem Abschluss:

- GABRIEL, Christoph: Simulations- und Messverfahren zur Vorhersage des strömungsinduzierten Lärms in der PKW-Fahrgastzelle, FAU Erlangen-Nürnberg
- GRABINGER, Jens: *Finite-Elemente-Verfahren zur Berechnung der Schallabstrahlung von rotierenden Systemen*, FAU Erlangen–Nürnberg
- HORN, Peter: Lärmentstehung in luftführenden Systemen, FAU Erlangen-Nürnberg
- MÜLLER, Stefan: Fluid-Struktur-Wechselwirkung und deren Schallabstrahlung bei der Überströmung starrer und flexibler Strukturen, FAU Erlangen-Nürnberg
- PUTNER, Jakob: Klangqualitätsbezogene Übertragungspfadanalyse und -synthese, TU München
- SCHEIT, Christoph: Application of Hybrid Aeroacoustic Methods on Multicore Systems, FAU Erlangen–Nürnberg
- VOLK, Adrian: Lärmreduktion bei elektrischen Leistungstransformatoren, FAU Erlangen-Nürnberg
- YOU, Jae Hun: Analyse aerodynamischer Schallquellen gekapselter Heckrotoren, TU München

# A.2. Wissenschaftliche Preise

- GABRIEL, Christoph Best Paper and Presentation Award, International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Merano
- MÜLLER, Stefan EAA travel grant for young researchers für die Fachtagung Euronoise 2012 in Prag
- PUTNER, Jakob DEGA travel grant für die Fachtagung Internoise 2012 in New York
- VOLK, Adrian "Rita Trowbridge Prize" 2013 für seinen Beitrag auf der Fachtagung COMPUMAG in Budapest

# A.3. Studentische Arbeiten

[59] BARTHELME, Henrik: Numerische Untersuchung der Lärmenstehung in Lüftungskanälen mittels Grobstruktursimulation, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Projektarbeit, 2013


- [60] BERGMANN, Thomas: Thermische, akustische und strömungsmechanische Untersuchung der Kühlung von Leistungsbaugruppen, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Bachelorarbeit, 2012
- [61] BIRK, Veronika: Aufbau, Test und Verifizierung eines Single Sheet Testers, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Projektarbeit, 2011
- [62] CHEN, Lizhuo: Vergleich von Beamforming-Algorithmen für aeroakustische Untersuchungen, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Diplomarbeit, 2010
- [63] DIVKO, Christoph: Untersuchung der Dieselhaftigkeit von Fahrzeugen in verschiedenen Fahrzuständen, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Studienarbeit, 2012
- [64] ENGELHARDT, Martin: Numerische Strömungssimulation eines Radialgebläses, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Projektarbeit, 2013
- [65] FEDCHENKO, Yuliya: Psychoakustische Untersuchungen einzelner Beiträge zum Fahrzeuginnengeräusch, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Diplomarbeit, 2013
- [66] FEUCHTGRUBER, Franziska: Auswirkungen verschiedener Einspannbedingungen dünner Platten auf Modendichte und Abstrahlgrad, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Bachelorarbeit, 2011
- [67] FOURATI, Ghassen: Entwicklung eines Oberflächenmikrofons zur Messung von strömungsinduzierten Oberflächendruckschwankungen, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Diplomarbeit, 2011
- [68] FREY, Sebastian: Psychoakustische Untersuchungen einzelner Beiträge zum Fahrzeugaußengeräusch, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Forschungspraktikum, 2013
- [69] GEDEON, Dominik: Kalibrierung einer Schallintensitätssonde, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Studienarbeit, 2010
- [70] GRAMS, Philipp: Übertragungseigenschaften von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Bachelorarbeit, 2012
- [71] HAAS, Sebastian: Akustische Untersuchungen an Auslassgeometrien f
  ür L
  üftungsanlagen, FAU Erlangen–N
  ürnberg, Lehrstuhl f
  ür Sensorik, Bachelorarbeit, 2011
- [72] HABERKERN, Tobias: Numerische Strömungsuntersuchungen zur Luftkühlung elektronischer Baugruppen, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Bachelorarbeit, 2011
- [73] HALLAS, Frank: Programmierung einer offenen Auswerteumgebung für Akustikmessdaten, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Bachelorarbeit, 2013
- [74] HALUF, Christopher: Aerodynamische und akustische Charakterisierung eines Radiallaufrads, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Studienarbeit, 2011
- [75] HANTKE, Simone: Psychoakustische Untersuchungen einzelner Beiträge zum Fahrzeugaußengeräusch, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Masterarbeit, 2013



- [76] HOFMANN, Alexander P.: Experimentelle Untersuchungen der Strömung in einem Lüftungskanal, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Bachelorarbeit, 2013
- [77] HORN, Johannes: Automatisierung und Erweiterung des Magnetmessplatzes "Single Sheet Tester", FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Projektarbeit, 2012
- [78] KESTEL, Philipp: Entwicklung einer Schnittstelle zwischen Pro/Engineer und ANSYS, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Projektarbeit, 2011
- [79] KESTEL, Philipp: Analyse und Berechnung der Schallausbreitung in Lüftungsanlagen, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Diplomarbeit, 2012
- [80] KIESCHNICK, Christina: Experimentelle Untersuchungen zur akustischen Optimierung der Kühlung elektronischer Baugruppen, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Studienarbeit, 2012
- [81] LANDGRAF, Maximilian: Untersuchungen zum Einfluss von numerischen Strömungsmodellen auf die berechnete Schallabstrahlung, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Studienarbeit, 2011
- [82] LAUMANN, Sascha: Implementation and Evaluation of an Operational Transfer Path Analysis System, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Masterarbeit, 2013
- [83] LEEN, Rienk: Entwicklung einer offenen Softwareumgebung zur Durchführung von Messungen am Impedanzrohr, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Projektarbeit, 2012
- [84] LIEBL, Katharina: Modellierung und Untersuchung der Dieselhaftigkeit moderner PKW, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Diplomarbeit, 2012
- [85] METZGER, Jochen: Weiterentwicklung eines Messsystems zur 3D-Positionsbestimmung für die Anwendung in der akustischen Messtechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Diplomarbeit, 2012
- [86] NOLL, Stephanie: Numerische Berechnungen des Strömungsfeldes um ein vereinfachtes Fahrzeugmodell, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Diplomarbeit, 2011
- [87] NUSSER, Katrin: Numerical simulation of the flow field around a simplified car model, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Masterarbeit, 2013
- [88] PASSLER, Andreas: Numerische Untersuchungen der Blattspitzenwirbel an einer Fenestronkonfiguration mittels unterschiedlicher Vernetzungsmethoden, TU München, Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Semesterarbeit, 2012
- [89] PIRCHER, Thomas: Aufbau und Simulation eines einfachen generischen SEA-Modells, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Projektarbeit, 2011
- [90] REISENWEBER, Hagen: Analyse und Optimierung der Luftkühlung von Leistungsbaugruppen unter Berücksichtigung strömungsmechanischer und akustischer Aspekte, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Bachelorarbeit, 2013



- [91] RÖSCH, Christian: Aufbau eines Radialgebläses und aeroakustische Untersuchung in einer spezifischen Testumgebung, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Bachelorarbeit, 2013
- [92] SCHRÖDER, Michael: Akustische Bestimmung von Materialparametern, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Studienarbeit, 2010
- [93] STEIN, Victor: Aeroakustische Untersuchungen an einer Fenestron- Konfiguration, TU München, Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Semesterarbeit, 2012
- [94] UNTERSTENHÖFER, Juan: Empfindlichkeitsanpassung an MEMS-Mikrofonen zur Verwendung in der Strömungsmesstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Bachelorarbeit, 2013
- [95] UTZMANN, Johannes: Erweiterung eines Mikrofonarrays zu einer akustischen Kamera, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Bachelorarbeit, 2012
- [96] WEBER, Johannes: Numerische Untersuchung der Lärmenstehung in Lüftungskanälen, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik, Diplomarbeit, 2012
- [97] WÜST, Michael: Entwicklung eines Systems zur 3D-Positionsbestimmung für die Anwendung in der akustischen Messtechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Bachelorarbeit, 2011
- [98] YANG, Fan: Korrelationsanalyse zur Quelllokalisation von strömungsinduziertem Schall, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Studienarbeit, 2011
- [99] ZHOU, Long: Absorbing Boundary Conditions for Computational Acoustics, FAU Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, Masterarbeit, 2011
- [100] ZÖSMAYER, Johannes: Psychoakustische Untersuchungen einzelner Beiträge zum Fahrzeugaußengeräusch, TU München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, AG Technische Akustik, Forschungspraktikum, 2013