

# Modellierung der Akustik von Axialventilatoren unter gestörter Zuströmung

Philipp Dietrich<sup>1</sup>, Andreas Lucius<sup>1</sup>, Marc Schneider<sup>1</sup>,  
Lev Liberson<sup>2</sup>, Nils Reiche<sup>2</sup>, Roland Ewert<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, Deutschland, Email: philipp.dietrich@de.ebmpapst.com*

<sup>2</sup> *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Institut für Akustik und Strömungstechnik,  
38108 Braunschweig, Deutschland*

## Kurzzusammenfassung

Das Geräusch von in Geräten eingebauten Ventilatoren unterscheidet sich meist deutlich von Messungen auf dem Prüfstand. Ein Grund hierfür können saugseitige Bauteile, die die Zuströmsituation zum Ventilator beeinflussen, darstellen. Insbesondere bei Axialventilatoren, die hinter Wärmetauschern betrieben werden, ist dieses Verhalten zu beobachten. Zur Beurteilung des Geräusches und der Analyse von akustischen Quellmechanismen bei Ventilatoren unter gestörter Zuströmung gewinnen, neben experimentellen Untersuchungen, numerische Verfahren zunehmend an Bedeutung. Notwendig für die korrekte Vorhersage der Akustik ist die genaue Beschreibung der, im Vergleich zum Prüfstand, geänderten Grundströmung als auch der entstehenden Turbulenz. Für vergleichsweise einfache Zuströmstörungen, wie einem Turbulenzgitter oder einem saugseitigen Kasten, zeigen skalenauflösende CAA-Simulationen sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

In der Anwendung werden Axialventilatoren häufig saugend hinter Wärmetauschern betrieben. Durch die sehr kleinen Strukturen ist die notwendige skalenauflösende Simulation der dort vorherrschenden Strömung aktuell nicht wirtschaftlich realisierbar. In Kooperation mit dem DLR Braunschweig wurde eine Vorgehensweise zur Modellierung von Zuströmturbulenz in skalenauflösenden Simulationen entwickelt und getestet. Diese Methode ermöglicht die numerische Betrachtung der Akustik von Axialventilatoren hinter Wärmetauschern im wirtschaftlich vertretbaren Rahmen.

## Einleitung

Häufig werden Axialventilatoren saugend hinter Wärmetauschern betrieben. Die, im Vergleich zur Prüfstandkonfiguration, gestörte Zuströmung verursacht eine deutliche Erhöhung des emittierten Geräusches. Typischerweise lässt sich die Störung der Zuströmung hinter einem Wärmetauscher durch 3 Effekte beschreiben:

- Umlenkung der Strömung:  
Durch den Übergang von der meist rechteckigen Geometrie des Wärmetauschers auf den runden Wandring ist am Ventilator eine ungleichmäßige Verteilung der Zuströmgeschwindigkeit zu beobachten.

- Grobskalige Turbulenz:  
Strömungsablösung beispielsweise an Geometrieübergängen können zu vergleichsweise grobskaliger Turbulenz, die mit den Ventilatorschaufeln interagiert, führen.
- Kleinskalige Turbulenz:  
Die Durchströmung des Wärmetauschers erzeugt eine vergleichsweise kleinskalige Turbulenz, die stromab ebenfalls mit den Ventilatorschaufeln interagiert und die Akustik beeinflusst.

Im Rahmen vorhergehender Arbeiten (Dietrich et al. [1]) konnte gezeigt werden, dass durch skalenauflösende Simulationen die Auswirkungen der umgelenkten Strömung beziehungsweise der grobskaligen Turbulenz sehr gut wiedergegeben werden kann. Zur Bestimmung der kleinskaligen Turbulenz ist typischerweise die Auflösung der Geometrie des Wärmetauschers notwendig. Durch den meist sehr kleinen Abstand zwischen den einzelnen Wärmetauscherlamellen, der geringen Breite der Lamellen und den oft quer dazu verlaufenden Rohren ergibt sich bereits für die Erstellung eines geeigneten Rechengitters ein sehr hoher Aufwand. Basierend auf einer Teilauflösung eines typischen Wärmetauschers für RANS-Simulationen lässt sich die benötigte Zellanzahl für eine skalenauflösende Simulation mit mindestens 1 Milliarde Zellen abschätzen. Der damit einhergehende numerische Aufwand ist für die industrielle Anwendung aktuell nicht wirtschaftlich realisierbar. Um trotzdem eine Aussage über die Akustik eines Axialventilators hinter einem Wärmetauscher mit skalenaflösenden Simulationen zu erhalten ist daher eine Modellierung der vom Wärmetauscher generierten Turbulenz notwendig.

Das am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig entwickelte Tool FRPM (Fast Random Particle Method) ermöglicht die statistische Rekonstruktion von Turbulenz auf Basis von RANS-Simulationen. Durch den deutlich reduzierten numerischen Aufwand für RANS-Simulationen im Vergleich zu skalenauflösenden Akustik-Simulationen, lässt sich die vom Wärmetauscher erzeugte Turbulenz beschreiben und anschließend durch das FRPM-Tool für die skalenaflösende Simulation rekonstruieren. Für Informationen zum DLR-Tool FRPM und dessen Funktionsweise ist der interessierte Leser auf die Veröffentlichungen des DLR Braunschweig verwiesen (z.B. Ewert [2]).

## Aufbau der Kopplung

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der entwickelten Kopplung zwischen dem DLR-Tool FRPM und dem CFD-Tool StarCCM+ für die Verwendung von rekonstruierter Turbulenz in skalenauflösenden Simulationen beschrieben. Dieser Schritt ist erforderlich, da der bereits in StarCCM+ integrierte Turbulenzgenerator aktuell nicht im Zusammenhang mit Akustik-Berechnungen verwendet werden kann (vgl. Nothacker [3]).

Aus einer RANS-Simulation der betrachteten Geometrie werden die statistischen Eigenschaften der Strömung in einem Volumen hinter der Turbulenz erzeugenden Geometrie entnommen. Basierend auf diesen volumetrischen Daten werden die turbulenten Fluktuationen in vier Dimensionen durch das FRPM-Tool rekonstruiert. Dabei wird eine isotrope Verteilung der Turbulenz angenommen. Zusammen mit der berechneten Grundströmung aus der RANS-Simulation  $v_{RANS,i}$  wird mit den rekonstruierten turbulenten Fluktuationen  $v'_{FRPM,i}$  ein skalenaufgelöstes volumetrisches Strömungsprofil  $v_{Target,i}$  generiert (Gleichung 1).

$$v_{Target,i} = v'_{FRPM,i} + v_{RANS,i} \quad (1)$$

Das erzeugte volumetrische Strömungsprofil wird als Zielgröße zur Generierung eines Quellterms  $f_i$  in der Impulsgleichung verwendet. Dazu wird neben dem aktuellen Strömungsprofil  $v_{SRS,i}$  und der lokalen Dichte  $\rho$  der skalenauflösenden StarCCM+-Simulation ein Relaxationsfaktor  $\sigma$  benötigt (Gleichung 2).

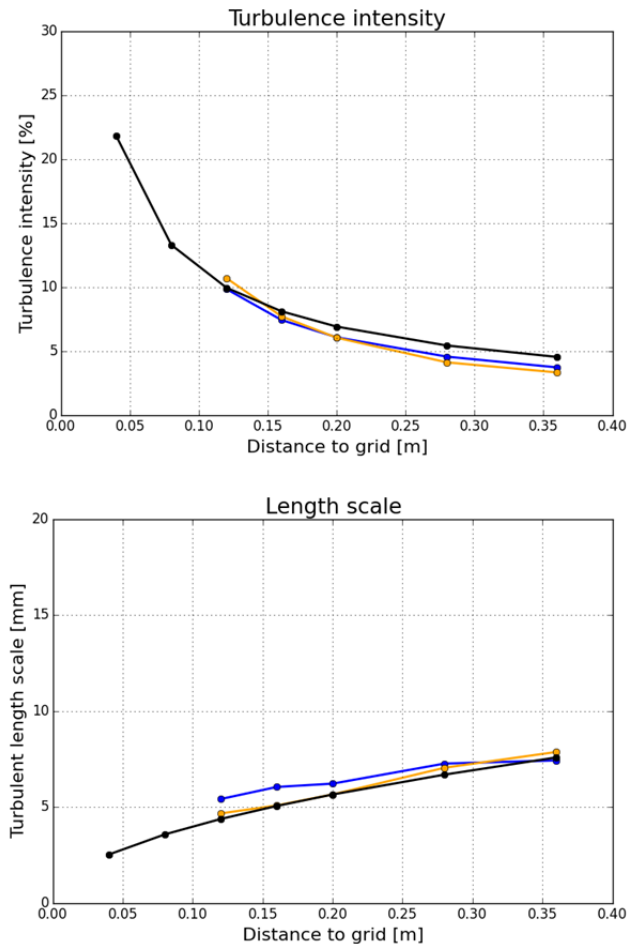
$$f_i = \sigma \rho (v_{Target,i} - v_{SRS,i}) \quad (2)$$

Zur Verhinderung von akustischem Störschall werden die erzeugten Quellen sowohl zeitlich als auch räumlich ein- und ausgeblendet.

## Test der Kopplung

Um die Funktionsweise und die korrekte Wiedergabe von Akustik zu überprüfen werden 2 generische Testfälle erzeugt. Dabei handelt es sich um eine mit skalenauflösenden Simulationen relativ einfach zu berechnende Strömung durch ein Turbulenzgitter. Durch periodische Randbedingungen wird eine unendliche Ausdehnung des Turbulenzgitters angenommen. Zur Überprüfung der Akustik werden zusätzliche Simulationen mit einem NACA0012-Tragflügel 16 cm hinter dem Gitter durchgeführt. Die Simulationen mit rekonstruierter Turbulenz aus dem FRPM-Tool werden ohne das Turbulenzgitter durchgeführt. Die turbulente Statistik wird aus einer zuvor berechneten RANS entnommen. Die Rekonstruktion der Turbulenz erfolgt zwischen 7 und 9 cm hinter dem Gitter. Dort kann nahezu isotrope Turbulenz angenommen werden.

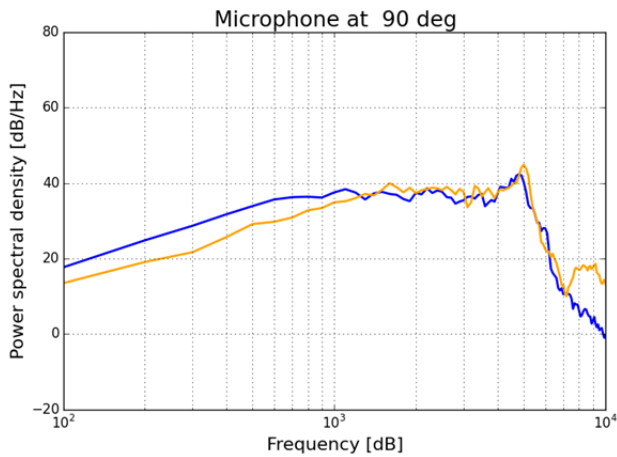
In Abbildung 1 ist die Verteilung der turbulenten Intensität und des turbulenten Längenmaßes (in Hauptströmungsrichtung) nach der Durchströmung des Gitters dargestellt. Die gezeigten Größen wurden jeweils auf ausgewählten Ebenen hinter dem Gitter gemittelt. Zusätzlich zur Simulation des kompletten Aufbaus wurden die Ergebnisse mit der von Roach et al. [4] empirisch bestimmten Korrelation verglichen.



**Abbildung 1:** Turbulenzintensität (oben) und turbulentes Längenmaß (unten) hinter dem Turbulenzgitter in der Simulation des gesamten Aufbaus (blau), der rekonstruierten Turbulenz mit FRPM (orange) und der Korrelation nach Roach (schwarz)

Neben dem Turbulenzgrad ist auch die Längenskala der Simulation mit über das FRPM eingebrachte Turbulenz in sehr guter Übereinstimmung mit der Korrelation nach Roach und der Simulation des gesamten Aufbaus. Einen Vergleich der Akustik des hinter dem Gitter positionierten Tragflügels ist in Abbildung 2 für ein Mikrophon 1 m über der Vorderkante des Tragflügels gezeigt. Die akustische Ausbreitung wird nach Ffowcs-Williams und Hawkings jeweils von der Tragflügeloberfläche aus berechnet.

Auch hier zeigt sich für Frequenzen größer  $\sim 1$  200 Hz eine sehr gute Übereinstimmung des spektralen Verlaufs als auch des Pegels der spektralen Leistungsdichte. Unterhalb dieser Frequenz ist ein niedrigerer Pegel



**Abbildung 2:** Spektrale Leistungsdichte eines Tragflügels unter turbulenter Zuströmung in der Simulation des gesamten Aufbaus (blau) und mit rekonstruierter Turbulenz mit FRPM (orange). Das Mikrophon befindet sich  $90^\circ$  zur Hauptströmungsrichtung 1 m über dem Tragflügel

zu beobachten. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Bereich zur Rekonstruktion der Turbulenz mit FRPM zu klein gewählt wurde, sodass große turbulente Längenskalen nicht korrekt abgebildet werden können.

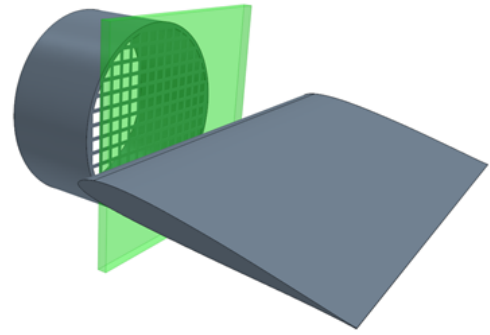
Mit diesen beiden Testfällen konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz in der Lage ist die Turbulenz als auch die Akustik einer Strömung korrekt wiederzugeben. Dieser Ansatz wird im folgenden anhand der Nachrechnung eines Tragflügels unter gestörter Anströmung mit experimentellen Daten verglichen.

### Tragflügel in gestörter Zuströmung

Im Windkanal der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) wurde ein Tragflügel in turbulenter Strömung aerodynamisch und akustisch untersucht. Direkt am Austritt der Windkanaldüse ist ein Turbulenzgitter zur Erzeugung der gestörten Zuströmung angebracht. 8 cm hinter dem Gitter befindet sich der 235 mm lange und 400 mm breite Tragflügel (vgl. Schrödter [5]). Die Zuströmungsgeschwindigkeit am Tragflügel beträgt ca. 42 m/s.

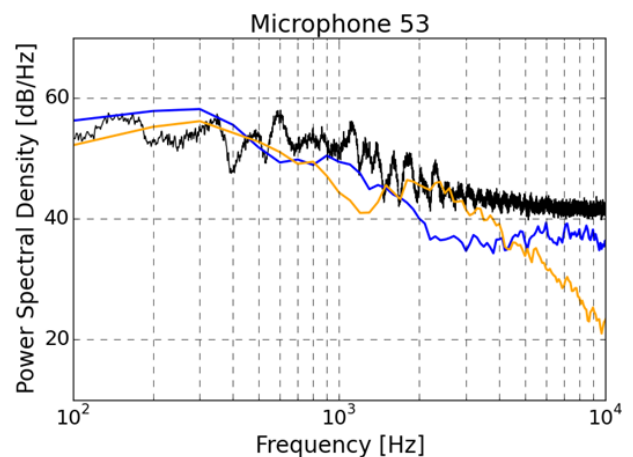
Im Unterschied zu den im vorherigen Abschnitt untersuchten Testfällen wird die Turbulenz bereits zwischen 3 und 5 cm hinter dem Gitter rekonstruiert. Aus den experimentellen Daten lässt sich schließen, dass an dieser Stelle noch nicht von isotroper Turbulenz ausgegangen werden kann. Da die Rekonstruktion mit dem FRPM-Tool eine isotrope Verteilung der Turbulenz annimmt können dadurch Abweichungen in den Simulationsergebnissen entstehen, allerdings kann aufgrund des experimentellen Aufbaus keine andere Stelle für die Turbulenzrekonstruktion verwendet werden. In Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des Tragflügels hinter dem Turbulenzgitter und dem FRPM-Gebiet dargestellt.

Die Ergebnisse der Simulation mit der rekonstruierten Turbulenz werden mit einer Simulation des gesamten



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau der Simulation des Tragflügels in gestörter Zuströmung. Die Turbulenzrekonstruktion erfolgt im grün dargestellten Gebiet

Aufbaus (vgl. Roth [6]) verglichen. Der Vorteil des vorgestellten Ansatzes zeigt sich vor allem in den benötigten Rechengittern. Während für die Simulation des gesamten Aufbaus ca. 84 Millionen Zellen verwendet wurden, werden für die Simulation mit rekonstruierter Turbulenz nur noch ca. 24 Millionen Zellen benötigt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den spektralen Vergleich der Schallleistungsdichte für ein Mikrophon 72 cm über der Hinterkante. Dieses Mikrophon ist Teil eines aus 56 Mikrophonen bestehenden Mikrophon-Arrays.



**Abbildung 4:** Spektrale Leistungsdichte des Tragflügels unter turbulenter Zuströmung in der Simulation des gesamten Aufbaus (blau), mit rekonstruierter Turbulenz mit FRPM (orange) und im Experiment (schwarz). Das Mikrophon befindet sich 72 cm über der Hinterkante des Tragflügels

Der allgemeine Pegel und Trend des Spektrums kann mit der Simulation mit rekonstruierter Turbulenz sehr gut wiedergegeben werden. Bei allen Mikrophonen des Mikrophon-Arrays lässt sich bei Frequenzen um 1 000 Hz ein Abfall des Pegels im Vergleich mit dem Experiment und der Simulation des gesamten Aufbaus erkennen. Bei Frequenzen um 3 000 Hz ist dagegen eine Erhöhung des Pegels im Vergleich zur Simulation des gesamten Aufbaus zu erkennen. Allerdings zeigt sich für alle Mikrophone, dass in diesem Bereich die Messung durch den Ansatz mit rekonstruierter Turbulenz sehr gut wiedergegeben werden kann.

Die Beamforming Auswertung der Messung und der beiden Simulationen ergibt hier keinen genaueren Aufschluss über die unterschiedlichen Vorhersagen der Spektren. Die Beamforming-Karten beider Simulationen weisen für die Terzbänder zwischen 1 000 und 4 000 Hz eine gute Übereinstimmung im Pegel als auch in der Verteilung der Quellen, welche hauptsächlich an der Vorderkante des Tragflügels gefunden werden, auf.

Neben der bereits zu Beginn des Abschnitts erwähnten isotropen Rekonstruktion der Turbulenz mit der FRPM-Methode, zeichnen sich in der Simulation mit rekonstruierter Turbulenz die Nachläufe des Gitters deutlich auf dem Tragflügel ab. Dies ist durch die Verwendung der RANS-Lösung als Grundströmung in diesem Ansatz bedingt. In der RANS-Simulation sind die Nachläufe des Turbulenzgitters im Vergleich zur skalenauflösenden Simulation mit LES deutlich stärker ausgeprägt und länger stromab im Strömungsfeld auszumachen.

Trotz der Unterschiede im Schalleistungsspektrum lässt sich festhalten, dass es mit dem hier vorgestellten Ansatz möglich ist die Akustik des Experiments in weiten Teilen sehr gut wiederzugeben. Im Vergleich zur Simulation des gesamten Aufbaus ist zudem die Verwendung deutlich reduzierter Rechengitter möglich.

## Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz beschreibt die Modellierung von gestörten Zuströmbedingungen zur Berechnung der Akustik von Ventilatoren in typischen Einbausituationen. Dazu wurde das am DLR entwickelte Tool FRPM mit der CFD-Software StarCCM+ gekoppelt. Diese Kopplung erlaubt die Verwendung von rekonstruierten turbulenten Schwankungen aus vorhergehenden RANS-Simulationen in skalenauflösenden Akustiksimulationen mit StarCCM+. Dadurch ist es möglich den Effekt von Einbausituationen, wie einem Wärmetauscher vor einem Axialventilator, auf die Akustik zu beurteilen. Dies ist aktuell mit einer skalenauflösenden Simulation des gesamten Aufbaus aufgrund der hohen numerischen Anforderungen nicht wirtschaftlich sinnvoll.

Der entwickelte Ansatz wurde zunächst an zwei einfachen Testfällen zur Überprüfung der korrekten Wiedergabe turbulenter Schwankungen und akustischer Charakteristiken getestet. Die entstehende Turbulenz als auch die Akustik stimmen sehr gut mit einer kompletten skalenauflösenden Simulation des gesamten Aufbaus überein. Eine Entstehung von Störschall, wie sie bei der in StarCCM+ bereits vorhandenen Synthetic Eddy Method (SEM) beobachtet werden kann, tritt im Rahmen der Testfälle nicht auf. Dies zeigt, dass das entwickelte Vorgehen in der Lage ist turbulente Schwankungen und daraus resultierende akustische Effekte ohne Auflösung der Turbulenz erzeugenden Geometrie wiederzugeben.

Ein Vergleich mit experimentellen Untersuchungen wurde anhand der Simulation eines Tragflügels unter gestörter Zuströmung vollzogen. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem entwickelten Ansatz im Vergleich zum Experiment und der

Simulation des gesamten Aufbaus. Im Vergleich zur Simulation des gesamten Aufbaus konnten die erforderlichen numerischen Ressourcen zudem deutlich reduziert werden. Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse konnten kleinere Abweichungen zum Experiment beziehungsweise der Referenzsimulation gefunden werden. Mögliche Ursachen wurden bereits identifiziert und werden in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet.

Durch die vorgestellten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass der vorgestellte Ansatz die Möglichkeit bietet, die Turbulenz, die durch eine komplexe Einbausituation eines Ventilators entsteht, in aeroakustischen Simulationen zu berücksichtigen. Die Turbulenz erzeugenden Bauteile müssen dabei nicht in einer wirtschaftlich nicht sinnvollen skalenauflösenden Simulation abgebildet werden, stattdessen werden diese im Vorfeld durch eine RANS-Simulation berechnet. Der nächste Schritt ist es den entwickelten Ansatz auf einen Axialventilator in gestörter Zuströmung anzuwenden und schließlich die Akustik eines Axialventilators hinter einem Wärmetauscher zu berechnen.

## Literatur

- [1] Dietrich, P. et al.: Aeroakustische Simulation von Axialventilatoren in gestörter Zuströmung. 4. Workshop „Strömungsschall in Luftfahrt, Fahrzeug- und Anlagentechnik“, Wien 2017
- [2] Ewert, R.: RPM - the fast Random Particle-Mesh method to realize unsteady turbulent sound sources and velocity fields for CAA applications. Proceedings of the 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2007
- [3] Nothacker M.: Aeroakustische Simulation von Tragflügeln unter gestörter Anströmung. Masterarbeit, Hochschule Heilbronn, 2018
- [4] Roach, P.: The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 8, Issue 2, June 1987, Pages 82 - 92
- [5] Schrödter, M.: Messung der Tragflügelaeroakustik von Axialventilatorprofilen mit poröser Vorderkante. Masterarbeit, Brandenburgische Technische Universität, 2016
- [6] Roth, T.: Numerische Simulation der Schallabstrahlung von Tragflügeln in turbulenter Zuströmung. Masterarbeit, Technische Universität Clausthal, 2017