Numerische Untersuchung von Laufrad-Leitrad-Kombinationen

Philipp Dietrich, Marc Schneider
ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, 74673 Mulfingen, Deutschland, philipp.dietrich@de.ebmpapst.com

Kurzzusammenfassung
Bei der Entwicklung neuer Ventilatoren ist neben den aerodynamischen Eigenschaften das erzeugte Geräusch von großer Bedeutung. Besonders bei Geräten, die in der Nähe von Menschen eingesetzt werden (Wärmepumpen, Dunstabzugshauben, PC-Kühlung) ist eine geringe Lärmentwicklung wichtig.Ventilatoren werden oft mit Nachleiträdern ausgestattet. Neben der Reduktion des Dralls im Abströmfeld können diese zudem als Tragestruktur für Motor und Laufrad verwendet werden. Durch den Einsatz von Nachleiträdern ist ein deutlicher Einfluss auf die Akustik zu beobachten.Neben experimentellen Untersuchungen der Akustik, gewinnen numerische Verfahren (CAA – Computational Aero Acoustics) für die Entwicklung von Ventilatoren zunehmend an Bedeutung. Diese ermöglichen einen detaillierten Einblick in die lokalen Strömungsphänomene. Im Rahmen dieser Untersuchung wird der Einfluss verschiedener Laufrad-Leitrad Kombinationen auf das erzeugte Geräusch mit verschiedenen Berechnungsmethoden simuliert. Die Ergebnisse werden anschließend mit experimentellen Daten verglichen. Dabei wird sowohl das breitbandige und tonale Geräusch untersucht. Es zeigt sich, dass besonders mit hochauflösenden Rechenmethoden (LES) viele akustische Phänomene korrekt vorhergesagt werden können. Durch den Vergleich verschiedener Laufrad-Leitrad Kombinationen können Rückschlüsse auf den Geräuschentstehungsmechanismus gezogen werden.

Einleitung
Ventilatoren, die beispielsweise in Kühleinheiten von Servern oder PCs eingesetzt werden, werden meist in Kombination mit einem Leitrad vom Hersteller geliefert. Dadurch kann der Drall im Abströmfeld reduziert und die aerodynamische Performance gesteigert werden. In Abbildung 1 ist beispielhaft eine Explosionsdarstellung einer Laufrad-Leitrad-Kombination dargestellt.

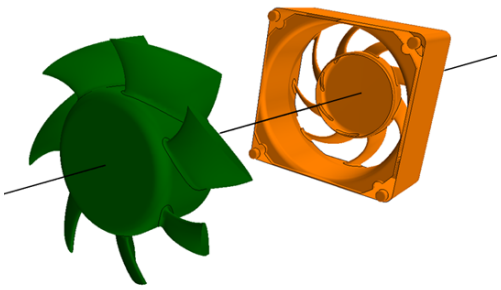

Abbildung 1: Explosionszeichnung einer Laufrad-Leitrad-Kombination.

Werden solche Ventilatoren in der Nähe von Menschen eingesetzt, spielt neben der Aerodynamik auch die Akustik eine zentrale Rolle. Abhängig von der verwendeten Kombination aus Laufrad und Leitrad können die akustischen Effekte sich teilweise deutlich unterscheiden. Abbildung 2 zeigt die aerodynamische und akustische Kennlinie 3 verschiedener Ventilatoren gleicher Baugröße und ähnlichen aerodynamischen Betriebspunkten (Markierung), die sich teilweise deutlich in der Akustik unterscheiden.

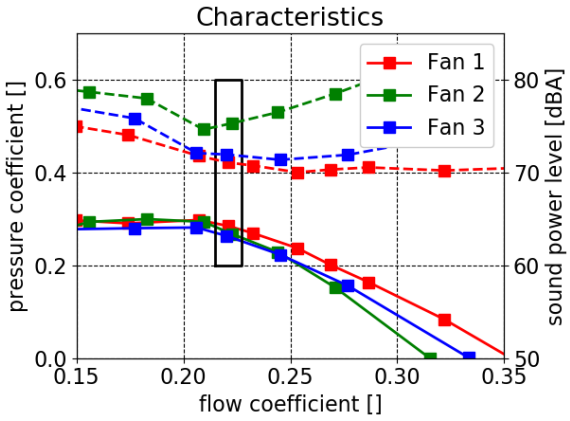

Abbildung 2: Aerodynamische (durchgezogene Linie) und akustische (gestrichelte) Kennlinie verschiedener Ventilatoren mit unterschiedlicher Laufrad-Leitrad-Kombination

Bei den betrachteten Geräten handelt es sich um Ventilatoren mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Nenndrehzahl von ca. 10 000 rpm. Die 3 Ventilatoren unterscheiden sich bezüglich der Anzahl der Lauf- und Leitschaufeln wie folgt:

Ventilator 1:

- 7 Laufschaufeln
- 9 Leitschaufeln

Ventilator 2:

- 7 Laufschaufeln
- 8 Leitschaufeln

Ventilator 3:

- 9 Laufschaufeln
- 8 Leitschaufeln

Das unterschiedliche akustische Verhalten ist vor allem tonal zu beobachten. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt. Das breitbandige Verhalten unterscheidet sich kaum zwischen den einzelnen Ventilatoren. Die tonalen Anteile der Lauf- und Leitschaufelordnungen unterscheiden sich

abhängig von der verwendeten Kombination allerdings deutlich.

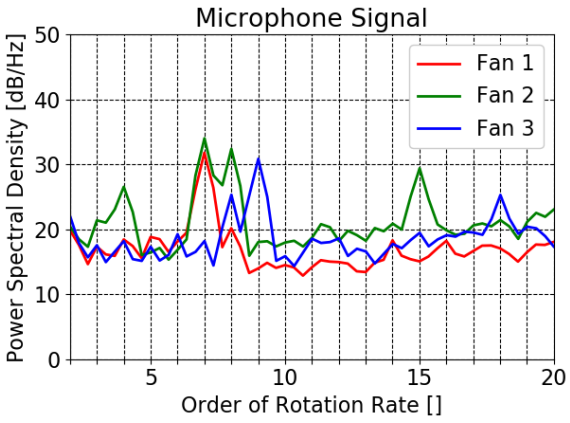

Abbildung 3: Akustisches Spektrum im betrachteten Betriebspunkt (vgl. Abbildung 2) in saugseitigem Mikrophon

Neben der experimentellen Untersuchung gewinnt die numerische Simulation akustischer Phänomene immer mehr an Bedeutung im Entwicklungsprozess von Ventilatoren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die in Abbildung 2 gezeigten Ventilatoren numerisch untersucht und hinsichtlich der für die Geräuschentstehung verantwortlichen Mechanismen untersucht.

Aufbau der Simulationen

Für die im Rahmen dieser Untersuchung gezeigten Simulationen wird ein ähnliches numerisches Setup verwendet. Dazu wird das Simulationsgebiet in einen rotierenden und stationären Bereich aufgeteilt. Das nichtrotationssymmetrische Gehäuse erfordert eine Unterteilung des Rechengebiet durch den Kopfspalt, um alle betrachteten Konfigurationen korrekt abbilden zu können. In Abbildung 4 ist ein Schnitt durch die stehende (rot) und rotierende (grün) Region um den Ventilator dargestellt.

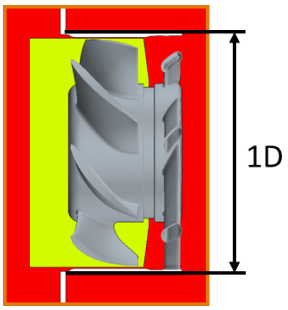

Abbildung 4: Unterteilung des Rechengebiets in stehende (rot) und rotierende (grün) Bereiche [D = 80 mm]

Neben der Unterteilung zwischen stehenden und rotierenden Regionen wird eine weitere Unterteilung des Rechengebiets in Form einer Halbkugel mit einem Durchmesser von 5 Ventilatordurchmessern D auf der Saugseite eingeführt. Dies dient dazu, eine akustische Ausbreitung nach Ffowcs-Williams und Hawkings (FWH) nicht nur von den schallharten Oberflächen des Ventilators sondern auch von der dadurch entstehenden saugseitigen Schnittstelle zu ermöglichen. Das gesamte restliche Rechengebiet besteht aus einer saugseitigen Halbkugel mit einem Durchmesser von 25 D und einem druckseitigen zylindrischen Auslass von 25 D im Durchmesser und 50 D Länge.

Zur aerodynamischen und akustischen Beurteilung der betrachteten Konfigurationen wird je Laufrad-Leitrad-Kombination eine Simulation mittels URANS (unsteady RANS) mit k-ϵ-Turbulenzmodell und LES (Large Eddy Simulation) durchgeführt. Münsterjohann et al. [1] zeigten, dass tonale Komponenten bei Ventilatoren dieser Baugröße mit einer URANS gut dargestellt werden können. In vorhergehenden Untersuchungen bei ebmpapst zeigten Lucius et al. [2] den Einsatz kompressibler Grobstruktur-Simulationen zur Bewertung der Akustik von Ventilatoren. Für diese Simulationen ergeben sich deutlich unterschiedliche Zellzahlen. Während das relativ grobe URANS Rechengitter mit ca. 1.5 Mio Zellen auskommt, werden für die LES ca 15 Mio. Zelle benötigt.

Simulationsergebnisse

Für die 3 verschiedenen untersuchten Ventilatoren wurden instationäre Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse werden im folgenden am Beispiel von Ventilator 2 vorgestellt. In Abbildung 5 ist der simulierte Betriebspunkt mit der Charakteristik des Ventilators verglichen.

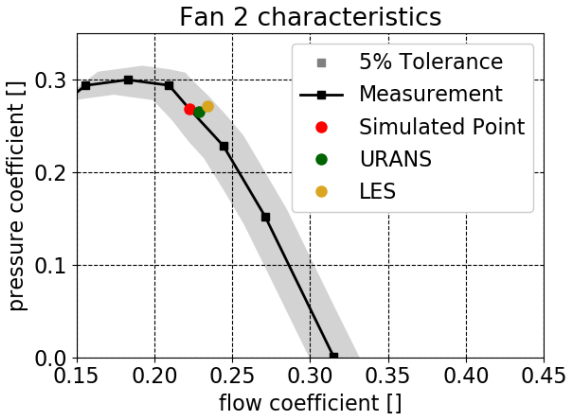

Abbildung 5: Vergleich der Aerodynamik für Ventilator 2

Wie für die anderen betrachteten Ventilatoren ebenfalls gezeigt, stimmt der berechnete Betriebspunkt gut mit den gemessen Werten überein. Zur Bestimmung der Aerodynamik und der Akustik wurden mindestens 6 Umdrehungen des jeweiligen Ventilators ausgewertet (URANS: 20 Umdrehungen; LES: 6 Umdrehungen).

In den Abbildungen 6 und 7 ist der Vergleich des akustischen Spektrums aus URANS (Abbildung 6) und LES Abbildung 7) mit den gemessenen Daten für ein saugseitig platziertes Mikrophon dargestellt. Für die Akustik aus der Simulation wurde jeweils die Ausbreitung mittels FWH direkt von den impermeablen Oberflächen (Surfaces) sowie von einem permeablen saugseitigen Interface (Interface) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass wie erwartet durch den Simulationsansatz der URANS die breitbandigen Anteile des Spektrums nicht dargestellt

werden können. Die 1. Ordnung der Laufschaufeln (stahlblau), die in der Messung sehr deutlich vorhanden ist, wir durch die URANS zwar als tonaler Anteil erkannt, allerdings wir der Pegel deutlich unterschätzt. Der ebenfalls deutliche tonale Anteil der 1. Ordnung der Leitschaufeln (magenta) im gemessen Spektrum wird durch die URANS gar nicht oder nur sehr schwach abgebildet.

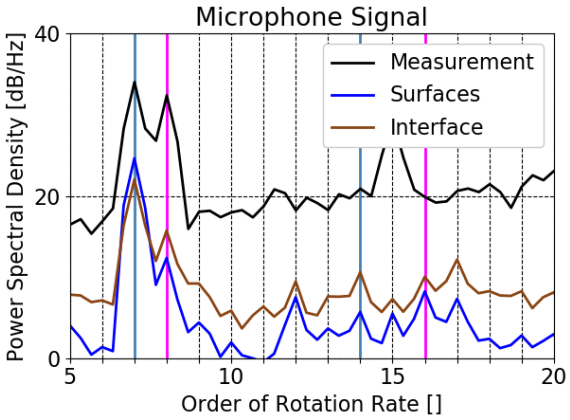

Abbildung 6: Akustisches Spektrum aus URANS in saugseitigem Mikrophon für Ventilator 2

Für die LES zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung der tonalen (1. Ordnung der Laufschaufeln) sowie der breitbandigen Anteile des Spektrums. Allerdings kann auch mit dem skalenauflösenden Ansatz die 1. Ordnung der Leitschaufeln nicht dargestellt werden. Auch ist zu erkennen, dass es Abweichungen zwischen der Ausbreitung direkt von den impermeablen Oberflächen (blau) und dem saugseitigen Interface (braun) gibt. Daraus lässt sich schließen, dass zur Beschreibung der Akustik für die betrachteten Rotor-Stator-Kombinationen Ausbreitungseffekte im Nahfeld eine wichtige Rolle spielen.

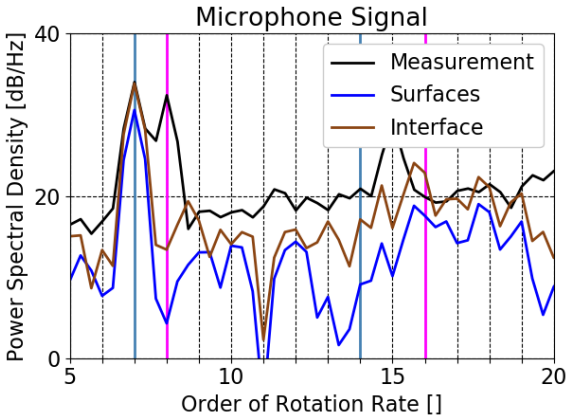

Abbildung 7: Akustisches Spektrum aus LES in saugseitigem Mikrophon für Ventilator 2

Zur weiteren Untersuchung der tonalen Anteile und des Fehlens der in der Messung deutlich vorhandenen 1. Ordnung der Leitschaufeln werden die Oberflächendrücke direkt auf den Lauf- und Leitschaufeln untersucht. Dazu wurde der Oberflächendruck an verschiedenen Stellen während der Simulation aufgezeichnet und spektral ausgewertet. Zur Reduktion von Rauschen wurde eine Mittelung der Amplituden über die Lauf- bzw. Leitschaufeln durchgeführt. In Abbildung 8 sind die Druckspektren für unterschiedliche Bereiche der Laufschaufel (Vorderkante - blau; Mittelsektor - grün; Hinterkante - blau) im schaufelfesten Koordinatensystem gezeigt.

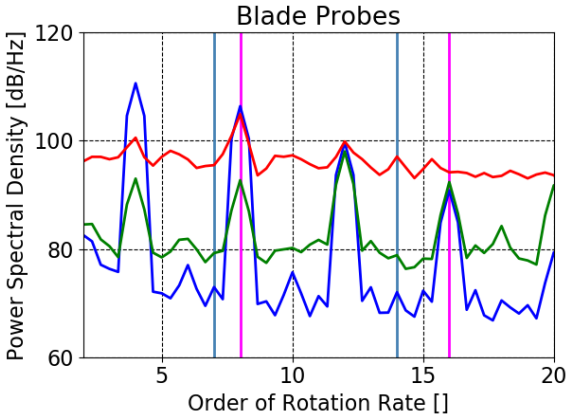

Abbildung 8: Druckspektren aus LES für Ventilator 2 (Vorderkante - blau; Mittelsektor - grün; Hinterkante - blau)

In allen Bereichen der Schaufel ist die Ordnung der Leitschaufeln (magenta) deutlich als tonaler Anteil im Druckspektrum auszumachen. Zudem zeigt sich ein sehr starker tonaler Anteil der 4 Ordnung der Drehzahl. Im Vorderkanten- und Mittelsektor der Schaufel ist zudem die 12. und 16. Ordnung deutlich tonal zu erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass diese Frequenzen sowie die 8. Ordnung (Ordnung der Leitschaufeln für Ventilator 2) harmonische Oberschwingungen der 4. Ordnung sind. Im Hinterkantensektor können die höheren Ordnungen nicht mehr deutlich identifiziert werden, da diese durch einen breitbandigen Anteil, vermutlich durch eine Ablösung der Strömung auf der Schaufel ausgelöst, verdeckt sind. Die 4. Ordnung passt zu einer Störung der Zuströmung zum Ventilator durch das Gehäuse, wie in Abbildung 1 dargestellt. Zur Identifizierung der einzelnen Anteile sind in Abbildung 9 die Druckspektren für Ventilator 1 dargestellt.

Durch die unterschiedliche Ordnung der Leitschaufeln (9. Ordnung) im Vergleich zu Fan 2 (8. Ordnung) lässt sich eine Aufteilung dieser Effekte beobachten. Die 4. Ordnung ist, wie aufgrund der Zuströmstörung zu erwarten, deutlich in allen Spektren, insbesondere an der Vorderkante, vorhanden. Zudem ist für den Vorderkanten- und Mittelsektor die 8. Ordnung deutlich zu erkennen. An der Hinterkante ist dagegen die Ordnung der Leitschaufeln deutlich als tonaler Anteil im Spektrum auszumachen. Dies deutet darauf hin, dass die Vorderkante und der mittlere Bereich der Schaufel stark von der vorherrschenden Zuströmstörung beeinflusst sind, während an der Hinterkante eine Stromaufwirkung der Nachleitschaufeln zu beobachten ist. Wie in der akustischen Auswertung beobachtet, führt dies allerdings nicht zu einem

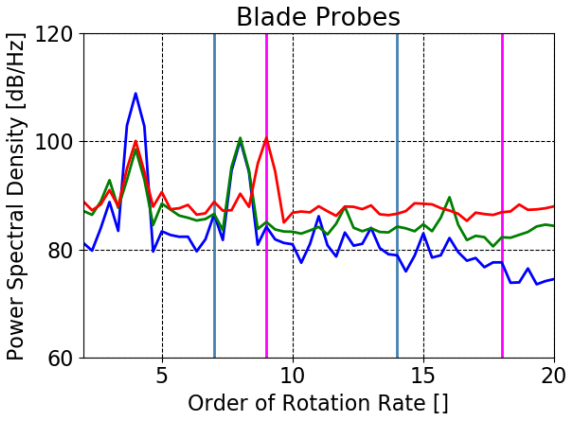

Abbildung 9: Druckspektren aus LES für Ventilator 1 (Vorderkante - blau; Mittelsektor - grün; Hinterkante - blau)

tonalen Anteil im Mikrophonsignal. Dieses Verhalten ist auch in den Druckspektren auf der Oberfläche der Laufschaufeln in Abbildung 10 gezeigt.

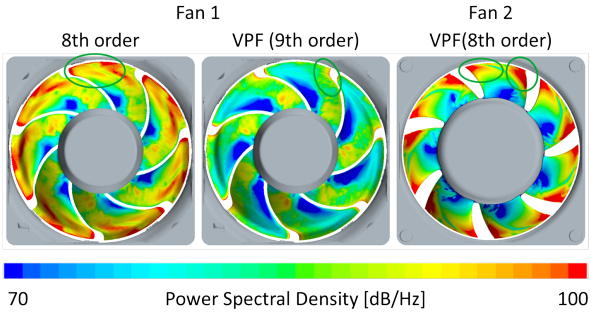

Abbildung 10: Tonale Komponenten der Druckspektren auf der Schaufeloberfläche

In der Druckverteilung auf der Oberfläche ist für Ventilator 1 ebenfalls die Aufteilung in den Effekt der Zuströmturbulenz (8. Ordnung dominant an der Vorderkante und im mittleren Sektor) und der Stromaufwirkung der Nachleitschaufeln (höhere Pegel an der Hinterkante bei 9. Ordnung) zu erkennen. Für Ventilator 2, bei welchem die 8. Ordnung und die Ordnung der Leitschaufeln übereinstimmen, ist sowohl an der Vorderkante als auch an der Hinterkante eine deutliche Pegelerhöhung zu erkennen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurden 3 Axialventilatoren mit unterschiedlicher Kombination von Lauf- und Leiträdern numerisch untersucht. Zur Bestimmung der aeroakustischen Eigenschaften wurden instationäre Simulationen mit unterschiedlichem Modellierungsgrad (URANS und LES) durchgeführt. Der aerodynamische Betriebspunkt konnte mit beiden verwendeten Ansätzen gut wiedergegeben werden. Mit der URANS konnte für die Akustik kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden, da die tonalen Anteile des Spektrums zwar bei der korrekten Frequenz gefunden wurden, der Pegel allerdings deutlich zu niedrig vorhergesagt wurde. Für die LES konnten sowohl die breitbandigen als auch die tonalen Anteile des Spektrums gut dargestellt werden. Hier zeigte sich, dass Ausbreitungseffekte bei dem verwendeten Aufbau eine Rolle spielen und nicht direkt von den impermeablen Oberflächen des jeweiligen Ventilators ausgebreitet werden darf.

Allen Simulationsergebnissen ist allerdings gemein, dass der Ton der Leitschaufeln, welcher in der Messung teilweise sehr deutlich zu sehen ist, nicht gefunden wird. Zur Identifikation weiterer Phänomene wurden die Druckfluktuationen auf den Lauf- und Leitschaufeln untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Schallentstehung bei der vorliegenden Kombination aus Laufrad und Gehäuse teilweise auf eine Zuströmstörung, die im Bereich der Vorderkante deutlich zu erkennen ist, zurückgeführt werden kann. Zudem wurde im Bereich der Hinterkante die Ordnung der Leitschaufeln auf der Laufschaufel identifiziert.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten verschieden Schallentstehungsmechanismen bei Rotor-Stator-Kombinationen identifiziert werden. Allerdings konnte der Ton bei der Ordnung der Leitschaufeln mit keinem der hier verwendeten Ansätze zuverlässig gefunden und der zugrundeliegende Mechanismus aufgezeigt werden. Dies wird Gegenstand weiterer experimenteller und numerischer Untersuchungen sein.

Literatur

[1] Münsterjohann, S. et al.: CAA of an Air-Cooling System for Electronic Devices; Advances in Acoustics and Vibrations, 2016

[2] Lucius, A. et al.: Experimental and numerical investigation of axial fan aeroacoustics at disturbed inflow conditions; Proceedings of FAN2018, Darmstadt, 2018