

High Efficiency Low Noise Heatpump Dryer (HELNoise)

Chris Eisenmenger¹, Stefan Frank², Hakan Dogan³, Martin Ochmann⁴

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 12459 Berlin, Deutschland, Email: c.eisenmenger@htw-berlin.de

² Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 12459 Berlin, Deutschland, Email: stefan.frank@htw-berlin.de

³ Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13353 Berlin, Deutschland, Email: hdogan@beuth-hochschule.de

⁴ Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13353 Berlin, Deutschland, Email: ochmann@beuth-hochschule.de

Einleitung

Bei der Entwicklung von Hausgeräten stehen Funktionalität, Design und Kosten im Vordergrund. Darüber hinaus werden Umweltaspekte immer wichtiger. Niedriger Energieverbrauch und geringe Geräuschemissionen spielen dabei eine zentrale Rolle. Den Lärm der eingesetzten Lüfter bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz zu reduzieren, ist das Hauptziel des Forschungsvorhabens HELNoise: Am Beispiel hocheffizienter Wärmepumpentrockner für Haushaltswäsche soll eine neue Generation von Ventilatoren mit hohem Wirkungsgrad und geringem Geräusch entwickelt und erprobt werden. Als Ansatzpunkt dienen zwei bereits abgeschlossene Forschungsvorhaben [1, 2].

In dieser Arbeit wird ein Referenzventilator mit 8 rückwärts gekrümmten Schaufeln für die ersten aerodynamischen sowie aeroakustischen Untersuchungen verwendet. Das Modell wird in erster Linie mit dem Ziel des hohen Wirkungsgrades mit punktweise berechneten Schaufeln und einem logarithmischen Spiralgehäuse ausgelegt. Im weiteren Verlauf des Projekts sollen akustische Eigenschaften sowie Baugröße optimiert werden.

Zur Bestimmung der aerodynamischen Parameter und Untersuchung des akustischen Nahfeldes dient eine kommerzielle Finite-Volumen Strömungssimulationssoftware (Ansys CFX). Die Ergebnisse der CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics), in Form der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung, werden anschließend, unter Verwendung der so genannten Akustischen Analogien, genutzt, um die Schallabstrahlung in das akustische Fernfeld zu bestimmen. Für die akustischen Berechnungen wird das Randelementverfahren (engl. Boundary Element Method BEM) genutzt.

Das Vorhaben HELNoise, FKZ: 03FH014PA5, wird im Rahmen des Programms Forschung an Fachhochschulen - Förderlinie FHprofUnt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Referenzmodell

Das Referenzmodell dient für erste aerodynamische sowie aeroakustische Untersuchungen und orientiert sich vorerst nur leicht an den Vorgaben für den konkreten Einsatz in Haushaltsgeräten. Es werden vielmehr verschiedene Turbulenzmodelle erprobt und miteinander verglichen. Des Weiteren dient das Referenzmodell dazu, erste Vergleiche zwischen CFD und BEM-Code, der Aeroakustik im Nahfeld des Rotors anzustellen.

Die Auslegung des Ventilators erfolgt nach Leonhard Bommers [3, 4]. Dabei unterscheidet sich die Auslegungsstrategie allerdings in Bezug auf die Schaufel- sowie Gehäuseform. Die klassische Kreisbogenschaufel wird durch eine punktweise berechnete Schaufel ersetzt wodurch ein höherer Wirkungsgrad zu erwarten ist. Ein weiterer Vorteil ist die größere Designvielfalt dieser Schaufelart. Durch Variation des Relativgeschwindigkeits- oder Schaufelwinkelverlaufes können unterschiedlichste Schaufelformen erprobt werden. Das 4-Radien Gehäuse wird durch eine ideal logarithmische Spirale ersetzt um so den Wirkungsgrad weiter zu steigern. Abbildung 1 zeigt den Rotor des Referenzventilators. Dieser wird im Laufe des Projektes an die speziellen Anforderungen des Einsatzes in Wärmepumpentrocknern angepasst.

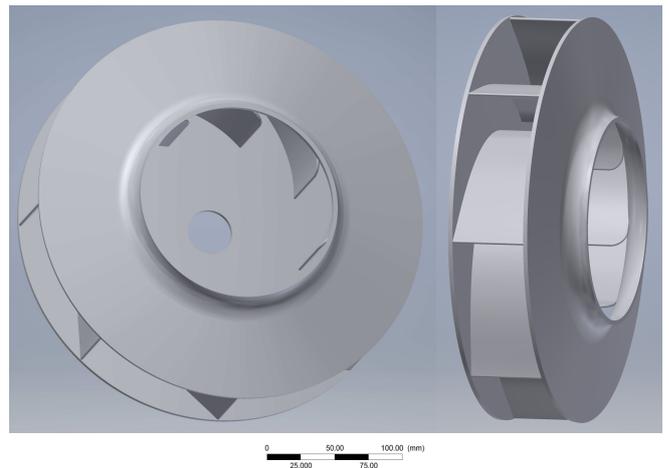


Abbildung 1: Referenzventilator für erste aerodynamische sowie aeroakustische Untersuchungen.

Numerische Methoden

In diesem Projekt wird ein hybrider CFD/BEM Ansatz genutzt, um die akustische Schallabstrahlung des Ventilators zu ermitteln. Die numerischen Strömungssimulationen werden für eine ausgewählte Anzahl Rotorumdrehungen durchgeführt und die zur Bestimmung des Wirkungsgrades benötigten Daten (Druckerhöhung und Rotordrehmoment) über einen gewissen Zeitraum gemittelt. Dadurch werden bauartbedingte Schwankungen in den Größen minimiert. Der zeitliche Verlauf der Druckfluktuationen an den Wänden des Spiralgehäuses und am Auslass des Modells (siehe Abbildung 2) werden erfasst und anschließend mittels Schneller Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier Transform

FFT) in den Frequenzbereich übertragen. Diese dienen als Eingangsgrößen des BEM-Codes, womit der Schalldruck an jedem Punkt im Nahfeld des Ventilatormodells berechnet werden kann. Unter Verwendung akustischer Analogien kann im Weiteren die Schallabstrahlung in das akustische Fernfeld ermittelt werden.

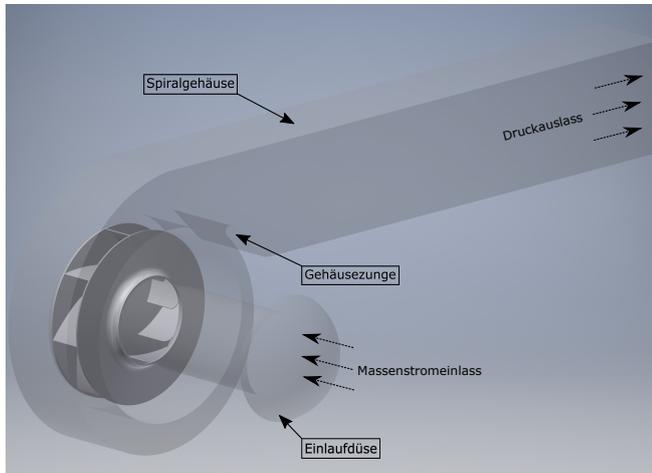


Abbildung 2: Simulationsmodell mit sichtbarem Referenzrotor. Die mittels CFD berechneten zeitlichen Druckschwankungen am Spiralgehäuse und am Druckauslass dienen als Eingangsgrößen für die akustischen Berechnungen.

Zum derzeitigen Stand des Projektes werden lediglich die Druckfluktuationen an den Rändern des Modells (Dipolquellen) als Schallquellen herangezogen. Die turbulente Strömung als Schallquelle (Quadrupolquellen), sowie die Fluidverdrängung im Rotor (Monopolquellen) werden vorerst vernachlässigt. Nach Sorguven *et al.* [5] sind die Beiträge von Monopol- und Quadrupolquellen an der Gesamtschallabstrahlung bei Machzahlen unter 0,6 bzw. 0,8 vernachlässigbar. Abbildung 3 zeigt, dass die maximal auftretenden Machzahlen bei etwa 0,1 liegen, womit die Strömung weiterhin als inkompressibel betrachtet werden kann.

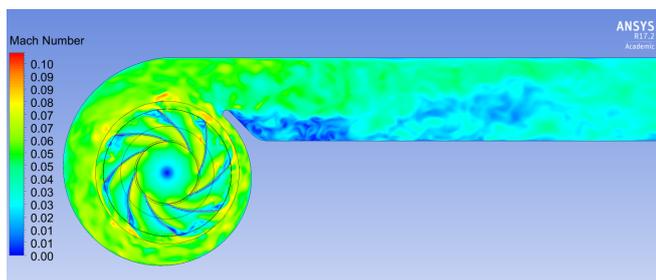


Abbildung 3: Darstellung der auftretenden Machzahlen. Bei Machzahlen unter 0,6 bzw. 0,8 können Mono- sowie Quadrupolquellen als Schallquellen vernachlässigt werden [5]. Ebenfalls kann die Strömung als inkompressibel betrachtet werden.

Strömungssimulationen

Die bisher durchgeführten numerischen Strömungssimulationen unterscheiden sich zum einen im genutzten Turbulenzmodell und zum anderen im Verlauf der Relativgeschwindigkeit zur Auslegung der

Schaufelkontur (w-Verlauf). Tabelle 1 gibt eine Übersicht der durchgeführten Simulationen und dem jeweiligen erreichten statischen Wirkungsgrad nach Gleichung 1 im Auslegungspunkt.

$$\eta_{stat} = \frac{\Delta p_{stat} \cdot \dot{V}}{M \cdot \omega} \quad [-] \quad (1)$$

Hier bedeuten:

- η_{stat} der statische Wirkungsgrad,
- Δp_{stat} die statische Druckerhöhung in Pa,
- \dot{V} der Volumenstrom in m^3/h ,
- M das Rotordrehmoment in Nm,
- ω die Winkelgeschwindigkeit des Rotors in 1/s.

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Simulationen
 SAS - Scale-adaptive Simulation
 DDES - Delayed Detached Eddy Simulation
 SBES - Stress-Blended Eddy Simulation

Variante	Parameter		
	Zeitschritt	w-Verlauf	stat. Wirkungsgrad
SAS-SST	1°/2°	linear	77,8 % / 77,3 %
DDES-SST	1°	linear	78,3 %
SBES	1°	quadratisch	73,1 %

Alle Turbulenzmodelle gehören zu den skalenauflösenden, hybriden LES/RANS Modellen (das Scale-adaptive Simulation Modell - SAS wird von Fröhlich *et al.* genauer als 2G-URANS bezeichnet [6]) und eignen sich daher für akustische Untersuchungen. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Handhabung turbulenter Strömungsgrößen und Längenskalen sowie in der Realisierung des Übergangs zwischen RANS- (Reynolds-averaged Navier-Stokes) und LES- (Large Eddy Simulation) Gebieten in der Strömung. Die Modelle haben etwa die gleichen Anforderungen an die räumliche wie auch zeitliche Diskretisierung und basieren, in RANS-Gebieten, auf dem SST-Modell (Shear Stress Transport).

Die Berechnungen werden auf unstrukturierten Tetraedernetzen, bestehend aus 28-30 Millionen Knoten durchgeführt. Abbildung 4 zeigt einen radialen Ausschnitt des Netzes für die SBES Simulation.

Zur Auflösung der Grenzschichten werden je nach Region im Modell 12-15 Prismenschichten genutzt. Die Höhe der ersten Schicht ist so gewählt, dass sich ein dimensionsloser Wandabstand von $Y^+ \approx 1$ ergibt, was für alle SST Modelle empfohlen wird. Die Gesamthöhe sollte so gewählt werden, dass der Übergang in das freie Strömungsgebiet komplett innerhalb der Prismenzellen liegt. Eine Möglichkeit der Darstellung besteht darin, näherungsweise die Höhe der Grenzschicht in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit aufzuzeigen. Es ist allgemein anerkannt, dass die Grenzschicht in

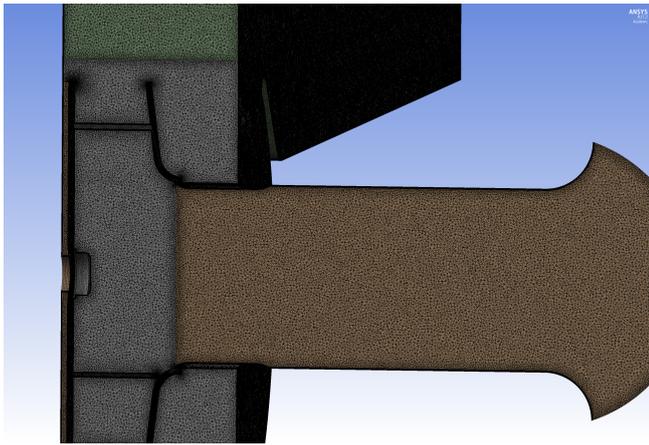


Abbildung 4: Darstellung des numerischen Gitters der SBES Simulation, bestehend aus ca. 29 Mio. Knoten. Die Schnittebene liegt radial in der Mitte des Rotors.

Richtung der Wandnormalen, in guter Näherung, so weit reicht, bis die tangentielle Geschwindigkeit in der Grenzschicht 99 % der Geschwindigkeit der freien Strömung angenommen hat. Abbildung 5 zeigt dies im Gehäuse des Ventilators. Die freie Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung beträgt etwa 8,5 m/s. Wie zu erkennen ist, liegt der Übergangsbereich vollständig innerhalb der Prismenzellen.

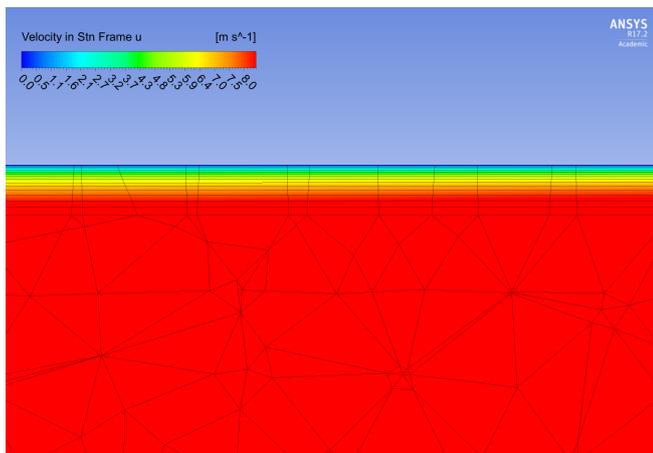


Abbildung 5: Näherungsweise Darstellung der Grenzschichtdicke im Gehäuse des Ventilators. Die tangentielle Geschwindigkeit in der Grenzschicht erreicht noch innerhalb der Prismenzellen 99 % der freien Strömungsgeschwindigkeit.

Die Zeitschritte richten sich nach der Drehzahl des Rotors und sind so gewählt, dass sich der Rotor in jedem Schritt 1 bzw. 2° dreht. Jeder Zeitschritt wird mit 3-5 inneren Iterationen aufgelöst um eine ausreichende Konvergenz der Gleichungen sicherzustellen. Die Konvergenz in jedem Zeitschritt gilt als sichergestellt, wenn die Residuen ein RMS (Root Mean Square) von 10^{-4} und ein Erhaltungsziel von 1 % erreichen. Erst dann wird der nächste Zeitschritt berechnet.

Zur räumlichen Diskretisierung der zu lösenden Gleichungen empfiehlt Ansys für skalenauflösende Modelle das *Bounded Central Difference* Schema für die adve-

tiven Terme. Dieses ist weniger dissipativ als die standard Upwind-Verfahren und kann den Übergang zwischen RANS- und LES-Bereichen mit akzeptabler Genauigkeit realisieren [7]. Die konvektiven Terme der turbulenten Transportgleichungen sind weniger kritisch und sollten mit einem Verfahren 1. oder 2. Ordnung realisiert werden. In dieser Arbeit wird das *Bounded Second Order Implicit Euler* Schema zur zeitlichen Diskretisierung verwendet.

Ergebnisse

Die aerodynamischen Ergebnisse der Simulationen in Form des Wirkungsgrades sind bereits in Tabelle 1 zusammengefasst. Die erreichten Werte zeigen nur kleine Abweichungen voneinander. Der etwas geringere Wirkungsgrad der SBES Simulation könnte am quadratischen Verlauf der Relativgeschwindigkeit liegen wodurch sich, in diesem Fall, kürzere Schaufeln ergeben. Die dadurch niedrigeren Reibungsverluste stehen einer schlechteren Führung der Strömung in den Schaufelkanälen gegenüber wodurch größere Rezirkulations- und Ablösegebiete als bei der linearen Ausführung entstehen (dies ist rein qualitativ in den Abbildungen 3 und 6 zu erkennen).

Abbildung 6 zeigt die Turbulente kinetische Energie in der axialen Ebene durch die Mitte des Rotors (2° SAS-SST). Es ist deutlich der turbulente Nachlauf an den Schaufelhinterkanten und die daraus resultierende Rotor-Stator Interaktion an der Gehäusezunge zu erkennen. Die entstehenden zeitlichen Druckfluktuationen gelten als eine der Hauptschallquellen von Radialventilatoren.

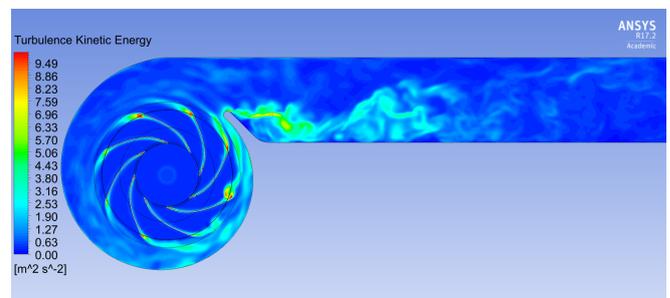


Abbildung 6: Sichtbarer turbulenter Nachlauf an den Schaufelhinterkanten und Rotor-Stator Interaktion als eine der Hauptschallquellen von Ventilatoren radialer Bauart. Darstellung der Turbulenten kinetischen Energie der 2° SAS-SST Simulation.

Die aus der Interaktion mit der Gehäusezunge entstehenden turbulenten Strukturen können mit Hilfe des Q-Kriteriums visualisiert werden. Abbildung 7 zeigt dies am Beispiel der SBES Simulation.

Zur Untersuchung des akustischen Nahfeldes werden Monitorpunkte, welche die zeitlichen Druckschwankungen erfassen, besonders in den Bereich um die Zunge platziert. Damit können erste Erkenntnisse zur Schallabstrahlung gewonnen und mit den BEM Ergebnissen verglichen werden. Des Weiteren können die Ergebnisse der verschiedenen Simulationen miteinander verglichen wer-

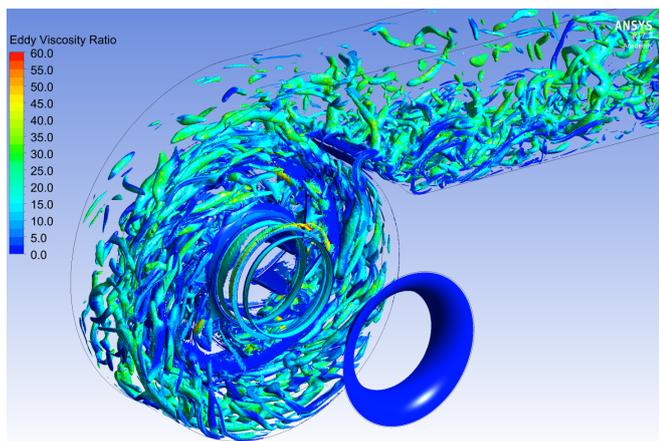


Abbildung 7: Darstellung der turbulenten Strukturen im Rotor und hinter der Gehäusezunge der SBES Simulation mittels Q-Kriterium für $Q = 250.000s^{-2}$.

den. Abbildung 8 zeigt die Terzbandpegel der 3 Turbulenzmodelle (2° SAS-SST Simulation) direkt an der Gehäusezunge.

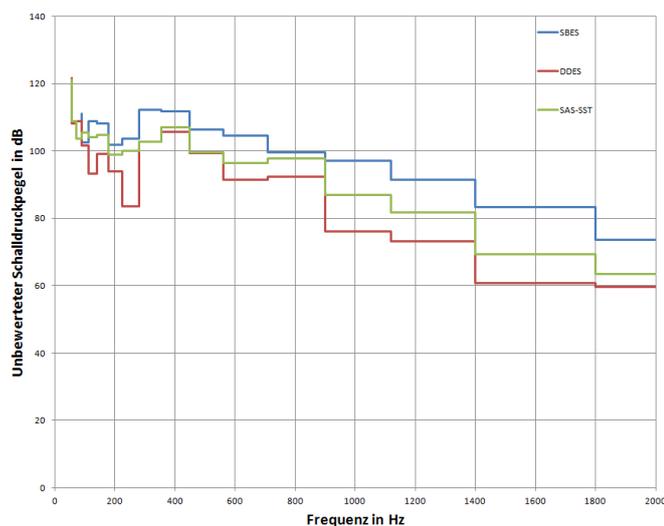


Abbildung 8: Vergleich der Simulationsmodelle mittels Terzbandpegel unmittelbar an der Gehäusezunge.

Die SAS-SST (grün) und DDES (rot) Simulationen zeigen gute Übereinstimmung im Bereich der Blattfolgefrequenz (BPF) bei 400 Hz. Unterhalb der BPF weichen die Werte zum Teil stark voneinander ab. Im oberen Frequenzbereich zeigt sich eine qualitative Übereinstimmung der SAS und DDES. Der quantitative Unterschied kann sich durch den größeren Zeitschritt und die damit niedrigere Auflösung der SAS ergeben. Die Schalldruckpegel der SBES (blau) sind im gesamten Frequenzbereich höher, was vermutlich an der turbulenteren Schaufeldurchströmung liegt.

Erste Vergleiche zwischen CFD und BEM mit den Ergebnissen der SAS-SST zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung im Bereich der BPF und darüber. Unterhalb der BPF weichen auch dort die Pegel teilweise stark voneinander ab.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden erste aerodynamische sowie aeroakustische Ergebnisse des Projektes HELNoise vorgestellt. Zum Vergleich von unterschiedlichen Turbulenzmodellen wurde ein Referenzventilator nach Leonhard Bommers ausgelegt und simuliert. Die zeitlichen Druckschwankungen in der CFD dienen anschließend als Eingangsgrößen für die BEM, um die akustische Schallabstrahlung in das Nah- und Fernfeld des Ventilators untersuchen zu können. Einige numerische Parameter wie Netzgröße, zeitliche und räumliche Diskretisierungsmethoden wurden genannt und die Ergebnisse, in Form turbulenter Strukturen, kurz vorgestellt. Ein erster Vergleich der Akustik im Nahfeld zeigt gute Übereinstimmung der Schalldruckpegel im Bereich der Blattfolgefrequenz.

Im weiteren Verlauf sollen vor allem Wirkungsgrad, Baugröße und akustische Eigenschaften des Ventilators optimiert und experimentell überprüft werden. Weiterhin soll durch variieren der numerischen Parameter eine bessere Übereinstimmung der Modelle im gesamten Frequenzbereich erreicht werden. Dafür sind sowohl Zeitschritt- als auch Netzunabhängigkeitsstudien notwendig. Die Berücksichtigung von Quadrupolquellen in den akustischen Gleichungen könnte zu einer besseren Übereinstimmung von CFD und BEM führen, was ebenfalls untersucht werden soll.

Literatur

- [1] Stuchlik A., Frank S.: Numerische Berechnung und Auslegung von Trommelläufer-Ventilatoren (NU-BAT). Forschungsbericht, HTW Berlin, 2011, ISBN 978-3-86262-011-1
- [2] Darvish M.: Numerical and Experimental Investigations of the Noise and Performance Characteristics of a Radial Fan with Forward-Curved Blades. TU Berlin, 2015
- [3] Bommers L., Fricke J., Grundmann R. (Hrsg.): Ventilatoren. Vulkan-Verlag, 2. Auflage, Essen, 2002
- [4] Bommers L., Korschenbroich, Reinartz D.: Entwurfs-polynome zur optimalen Auswahl und Bemessung von Industrieventilatoren radialer Bauart. Tagungsband Wissenschaftlich-Technische Konferenz Industrieventilatoren, Zakopane, 1997, 39-51
- [5] Sorguven E., Dogan Y., Bayraktar F., Sanliturk, K.: Noise prediction via large eddy simulation: Application to radial fans. Noise Control Engineering Journal 57(3) (2009), 169-178
- [6] Fröhlich J., von Terzi D.: Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows, Progress in Aerospace Science 44 (2008), 349-377
- [7] Ansys Inc.: Ansys CFX Reference Guide, Version 16, Canonsburg, 2015