

UNTERSUCHUNG DER DOPPELWIRBEL-STRÖMUNG IM GEHÄUSE EINES TROMMELLÄUFER-VENTILATORS MIT STEREO PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

INVESTIGATION OF THE DOUBLE VORTEX FLOW IN THE CASING OF A FORWARD CURVED FAN BY MEANS OF STEREO PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Bastian TIETJEN, Michael BENZ, Manoochehr DARVISH und Stefan FRANK

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

Wilhelminenhofstr. 75 A, 12459 Berlin

stefan.frank@htw-berlin.de

Schlagworte: Computational Fluid Dynamics, Vortizität, Radialventilator

Key words: Computational Fluid Dynamics, vorticity, radial fan

Zusammenfassung

Es wird die Strömung im Gehäuse eines Trommelläufers bei verschiedenen Volumenströmen und konstanter Drehzahl mittels drehwinkelkorrelierter Stereo Particle Image Velocimetry untersucht. Das Geschwindigkeitsfeld wird in drei Ebenen gemessen, eine parallel zur Hauptströmungsrichtung, zwei normal zur Hauptströmungsrichtung. Auf diese Art kann die komplexe Sekundärströmung im Gehäuse mittels Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV) eindeutig nachgewiesen und über die Kennlinie gesehen untersucht werden. Der Vergleich mit stationären und instationären Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS bzw. URANS) und Detached Eddy Simulationen (DES) zeigt eine gute Übereinstimmung bezogen auf die Absolutgeschwindigkeit, die Sekundärströmung wird jedoch mittels URANS und DES deutlich besser berechnet.

Einleitung

Trommelläufer-Ventilatoren sind radiale Strömungsmaschinen bestehend aus zahlreichen kurzen, vorwärts gekrümmten Schaufeln. Die Vorwärtskrümmung bewirkt einen hohen Energietransfer vom Ventilator auf das Förderfluid, jedoch auf Kosten von zahlreichen Grenzschichtablösungen innerhalb der Schaufelkanäle und daher auch relativ niedrigen Wirkungsgraden. Dennoch hat ihre hohe Leistungsdichte und daher geringer Bauraum zu einer starken Verbreitung im Bereich der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik geführt (Fitzner 2008). Trommelläufer werden mit einem Gehäuse verwendet, welches die hohe kinetische Energie in Druckenergie umwandelt (Carolus 2013). Abb. 2 zeigt schematisch einen solchen Aufbau, Drehrichtung und Hauptströmungsrichtung sind eingezeichnet. Die Strömung tritt auf der abgewandten Seite axial in den Ventilator ein, wird beschleunigt und verlässt ihn radial in das Gehäuse. Zusammen mit den erwähnten Grenzschichtablösungen entsteht so eine stark drei-dimensionale Strömung, welche bereits Gegenstand verschiedener Arbeiten war. 1979 wurde von Zierep et al eine wirbelnde Sekundärströmung nachgewiesen, was später mit experimentellen Verfahren wie der Particle Image Velocimetry und der Stereo Particle Image Velocimetry sowie numerischen Methoden bestätigt wurde (Kwon et al 2001, Klemm 2005, Frank et al 2011, Frank et al 2012). Diese Sekundärströmung über die Kennlinie zu untersuchen ist einmal aus strömungstechnischer Sicht interessant, des Weiteren ist ihre Komplexität ein guter Indikator zum Validieren numerischer Methoden.

Material und Methode

Der hier verwendete Stereo Particle Image Velocimetry Aufbau besteht aus einem Kammerprüfstand zum Bestimmen des Druckaufbaus und Volumenstroms, genauer in Frank et al 2011 beschrieben. Das Gehäuse des Trommelläufers ist aus einem Stück Acrylglas gefertigt und erlaubt es so, den gepulsten Nd:YAG-Laser durch das obere Gehäuseteil für die Stereo PIV zu positionieren. Die vordere Wand des Gehäuses besteht ebenfalls aus Acrylglas und ermöglicht so die Fotoaufnahmen. Die notwendigen Tracer-Partikel (DEHS Aerosol) können mehrere Meter stromaufwärts direkt in den Kammerprüfstand geleitet werden. Über einen externen Laserdrehzahlmesser an der Antriebswelle wird realisiert, dass die Aufnahmen stets bei der gleichen Winkelposition geschehen. Pro Messung werden 111 Doppelbilder pro Kamera aufgenommen und daraus ein gemitteltes Geschwindigkeitsfeld gebildet.

Abb. 1 zeigt die Kennlinie des untersuchten Trommelläufers. Sowohl Volumenstrom als auch Druckaufbau werden in dimensionsloser Form dargestellt. Sie lässt sich grob unterscheiden in Drossel- und Überlastbereich und dem dazwischen liegenden Best Efficiency Point, dem Betriebspunkt mit höchstem Wirkungsgrad. Sechs Punkte auf der Kennlinie werden mit Stereo PIV Messungen analysiert. Jeder Punkt auf der Kennlinie wird in drei Ebenen untersucht (Abb. 2), eine Ebene liegt parallel zur Hauptströmungsrichtung mittig im Gehäuse (Ebene 3), zwei Ebenen (Ebenen B und C) liegen normal zur Hauptströmungsrichtung. Ebene B steht dabei auf dem Trommelläufer, Ebene C auf der Zunge kurz nach dem Trommelläufer. Die Winkel zwischen dem Messebenen-Normal und den Kameraachsen sind für die Ebene 3 ca. $\pm 30^\circ$, für die Ebene B ca. $\pm 48^\circ$ und für die Ebene C $-51,5^\circ$ und 46° . Insbesondere die beiden Ebenen B und C sind somit nah an dem 45° -Optimum für eine ausgewogene Messgenauigkeit zwischen In- und Out-of-Plane Komponenten (Prasad 2000, Raffel et al 2007). Die Kameras sind auf einer gemeinsamen Traverse montiert, elektronisch gesteuerte Schrittmotoren erlauben das Einstellen und Ablesen der relevanten Winkel. Der Aufbau ist in Abb. 3 gezeigt. Um den kompletten Aufnahmebereich trotz des Winkels fokussieren zu können, sind die Kameras mit einem Tilt-Adapter zwischen Objektiv und Kameragehäuse ausgestattet. Zum Kalibrieren der Messebenen normal zur Hauptströmungsrichtung wird ein auf transparente Folie gedrucktes Target (Abb. 4) verwendet, welches mittig im Lichtschnitt positioniert wird und den Großteil des zu untersuchenden Bereichs abdeckt. Der gesamte Aufbau lässt sich nach Prasad (2000) als winkelvesetzte Kameras mit zweidimensionaler Kalibrierung und geometrischer Rekonstruktion beschreiben. Das Auswerten der Stereo PIV Daten erfolgt mittels einem adaptiven Multiple Pass Algorithmus, mehreren aufeinander folgenden Kreuz-Korrelationen mit stets kleiner

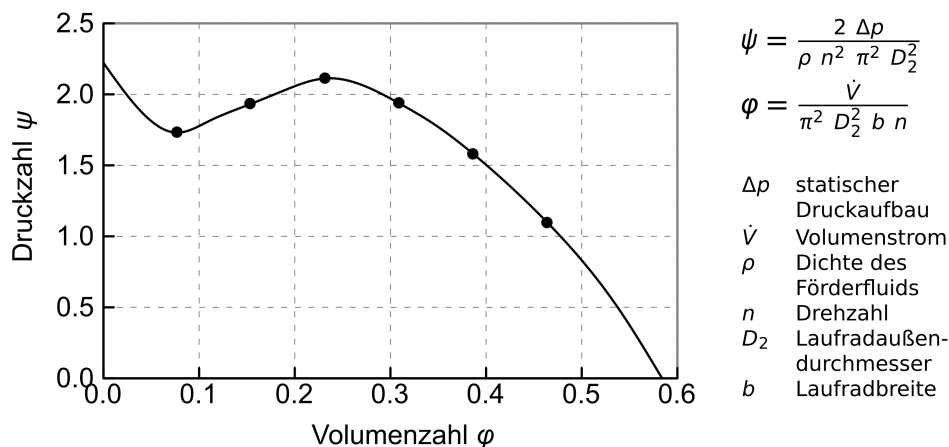


Abb. 1: Die Trommelläufer-Kennlinie (Ergebnis aus sieben einzelnen Kennlinienmessungen) mit den Aufnahmepunkten bei $\phi = 0,08; 0,15; 0,23; 0,31; 0,39; 0,46$.

werdender Interrogation Size. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, einen großen Geschwindigkeitsbereich zuverlässig auszuwerten (ILA 2004, Raffel et al 2007). Die finale Auflösung in horizontaler und vertikaler Richtung liegt für alle Messungen bei 2 bis 3,75 mm, bei ca. 95 % gültigen Vektoren.

Alle Stereo PIV Messungen werden zuerst in einem lokalen Koordinatensystem ausgewertet. Anhand von CAD-Daten des Gehäuses, bekannten Abmessungen der Targets und deren Position im Gehäuse lassen sich die Geschwindigkeitsfelder anschließend in ein gemeinsames PIV-CFD Koordinatensystem überführen, was den Vergleich untereinander vereinfacht.

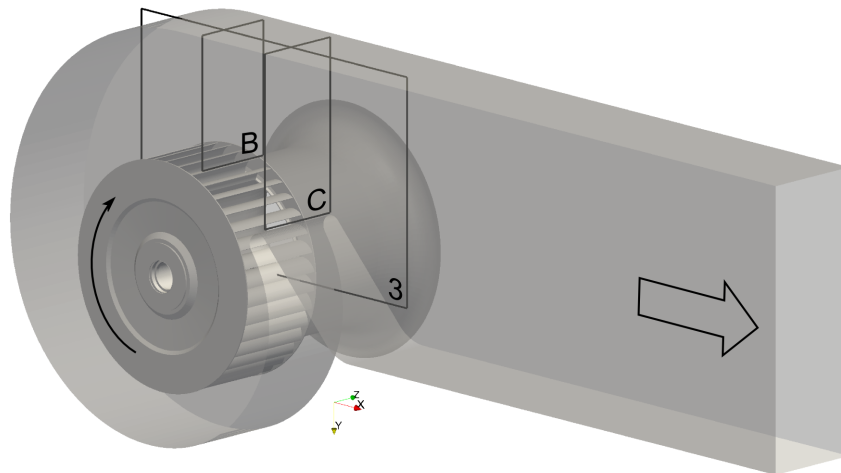


Abb. 2: Die relative Position der drei Messebenen im Gehäuse.

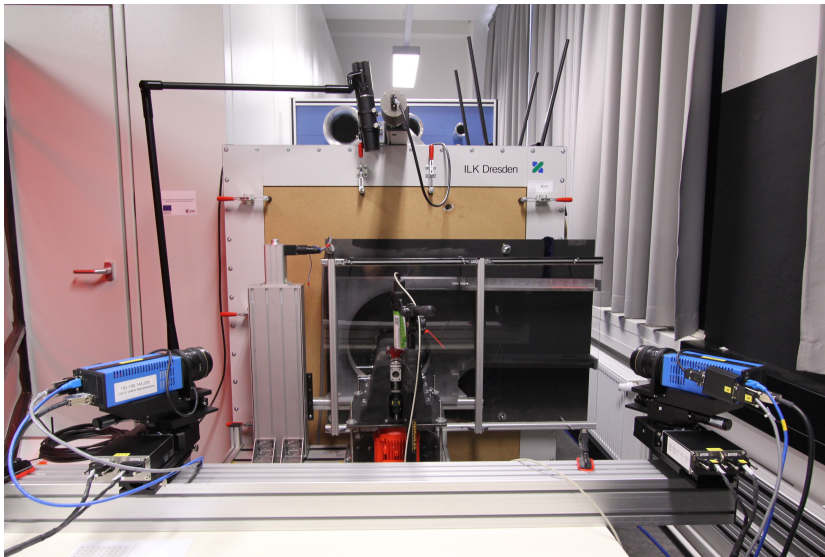


Abb. 3: Der experimentelle Aufbau mit Kameraprüfstand, Laserarm und beiden Kameras samt Schrittmotoren auf einer Traverse montiert.

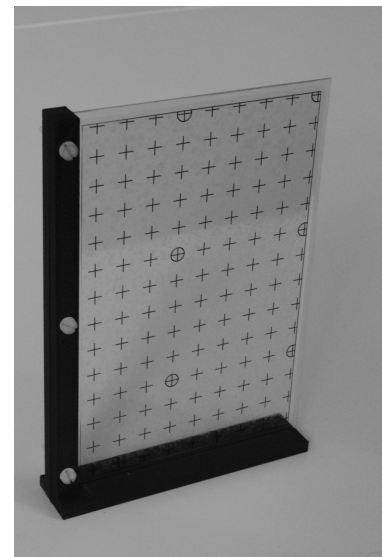


Abb. 4: Das transparente Target für die Ebenen B und C.

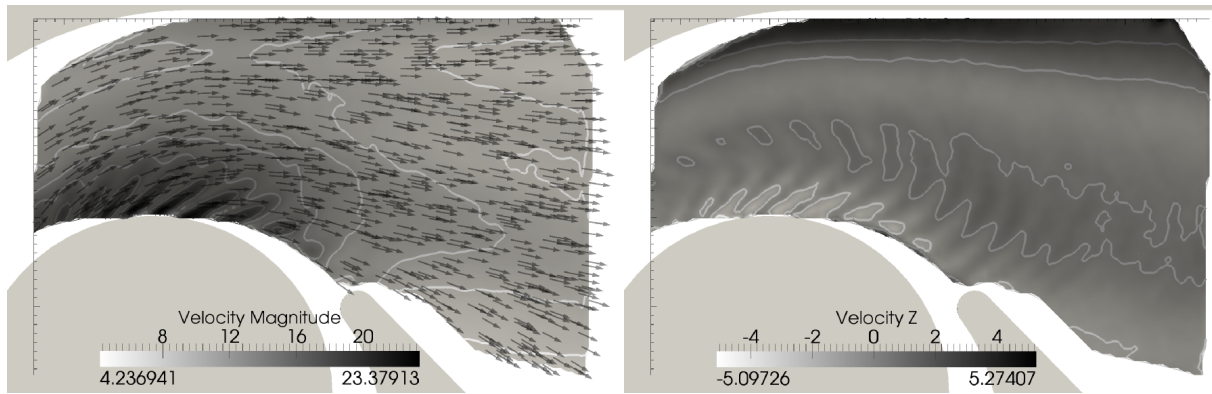


Abb. 5: Das Hauptströmungsfeld und die V_z -Komponente des Best Efficiency Point ($\varphi = 0,23$). Negative V_z -Werte strömen aus der Abbildung hinaus. Für diese und alle folgenden Abbildungen sind Geschwindigkeiten in m/s und Isolinien in 2 m/s Schritten.

Ergebnisse

Die vorherrschende Strömung entspricht vorher gemachten Erfahrungen (Frank et al 2011, Frank et al 2012), sehr hohe Geschwindigkeiten direkt am Trommelläufer, welche sich dann über das Gehäuse verteilen. Mittels der drehwinkelkorrelierten Messungen kann nun jedoch die Strömung direkt im Nachlauf der Schaufelkanäle aufgelöst werden (Abb. 5 links). Weiterhin lässt sich mit den drehwinkelkorrelierten Messungen zeigen, dass die Strömung stark drallbehaftet aus dem Trommelläufer austritt (Abb. 5 rechts).

Betrachtet man die Hauptströmung über dem Trommelläufer (Ebene B) im Querschnitt, lassen sich deutlich mehrere unterschiedliche Wirbelsysteme ausmachen, abhängig vom Punkt auf der Kennlinie (Abb. 7). Während dies im Drosselbereich ein relativ symmetrischer, nebeneinander stehender Doppelwirbel mit entgegengesetztem Drehsinn ist ($\varphi = 0,08$ bzw. $0,15$), zeigt sich im Best Efficiency Point ($\varphi = 0,23$) ein anderes Muster. Der linke Teil des vorigen Doppelwirbels ist fast völlig aus dem Aufnahmebereich verschwunden und zwei Wirbel mit gleichem Drehsinn stehen nun übereinander. Ebenso lässt sich der Nachlauf der Schaufelkanäle eindeutig ausmachen, wobei dieser auf den Bereich gegenüber des Eintritts beschränkt ist. Steigt der Volumenstrom weiter, bildet sich sogar ein dreifaches Wirbelsystem aus, bestehend aus dem gleichläufigen Doppelwirbel des Best Efficiency Point und einem weiteren, jedoch sehr schwachen Wirbel oben rechts (ab $\varphi = 0,31$). Bei den höheren Volumenströmen lässt sich in den Abbildungen rechts unten eine starke Abwärtskomponente ausmachen. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass man erwarten würde, dass die Luft vom Ventilator weg strömt. Dieser vom Ventilator weg strömende Bereich ist jedoch auf den Nachlauf der Schaufelkanäle beschränkt und beruht auf der typischen Verblockung durch das Ablösen in den Schaufelkanälen (vergleiche Abb. 6 und Roth 1981).

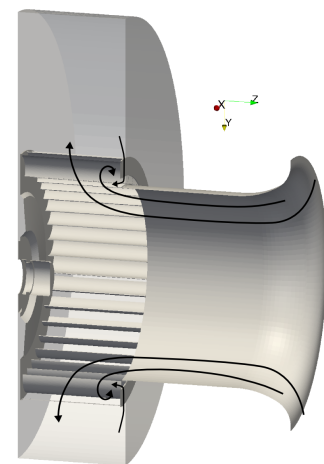


Abb. 6: Querschnitt durch Lauf- rad und Gehäuse mit stilisierter Ablösung und Spaltströmung.

Betrachtet man die Sekundärströmung über der Zunge, so ist diese deutlich einfacher (Ebene C, Abb. 8) und zeigt augenscheinlich wenig Übereinstimmung mit der wirbelbehafteten Sekundärströmung über dem Trommelläufer. Die Visualisierung der Fluidrotation oder Vortizität andererseits zeigt klar das gleiche Muster über dem Trommelläufer und der Zunge und bestätigt die Erfahrung von Zieryep et al (1979), dass sich die Wirbelzöpfe erst im Auslassstutzen auflösen.

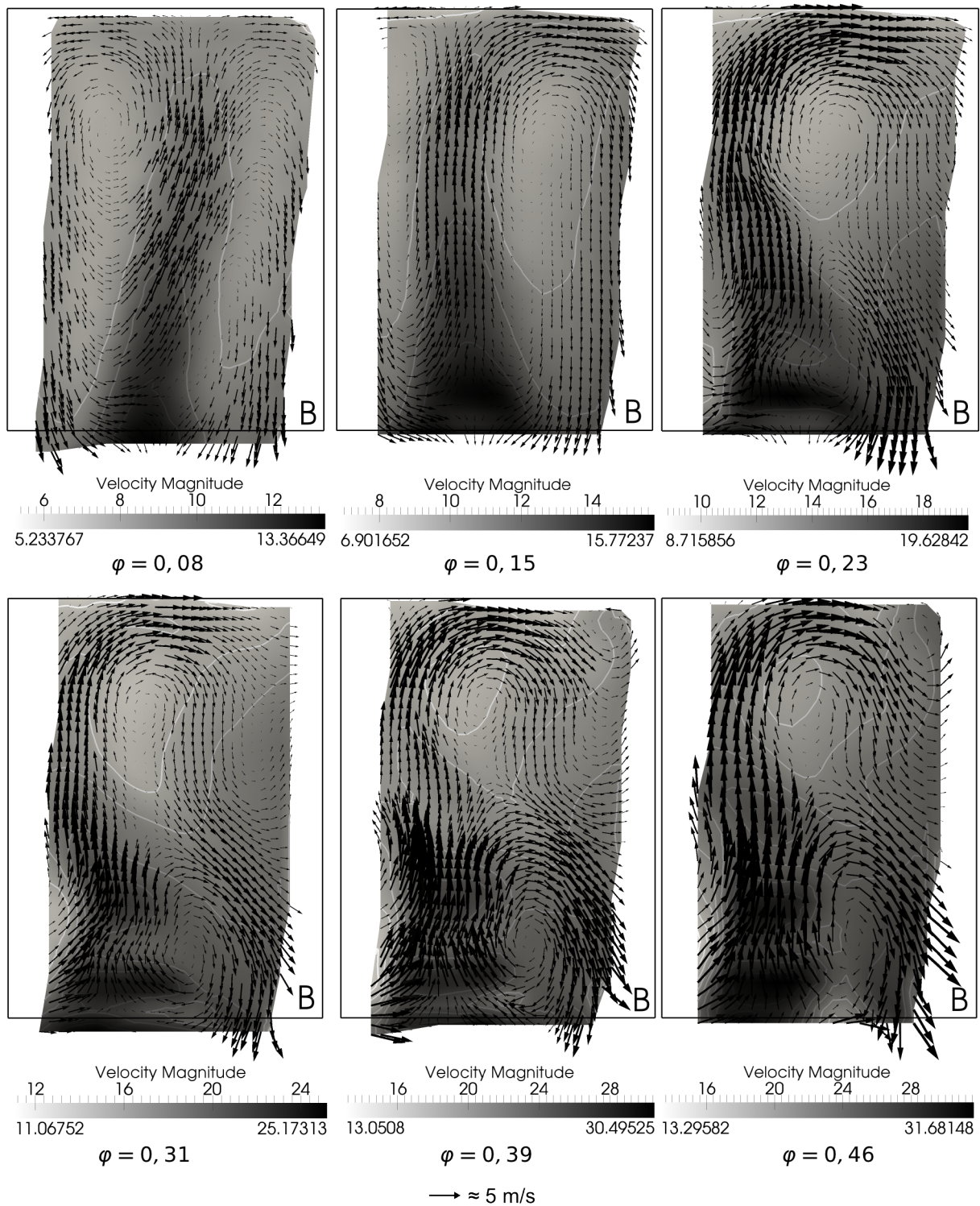


Abb. 7: Die verschiedenen Volumenströme über dem Trommelläufer, aufgenommen quer zur Hauptströmungsrichtung. Der Rahmen zeigt die eigentlichen Maße des Gehäuses. Die Pfeile zeigen die Sekundärströmung an und sind über die verschiedenen Abbildungen gleich skaliert.

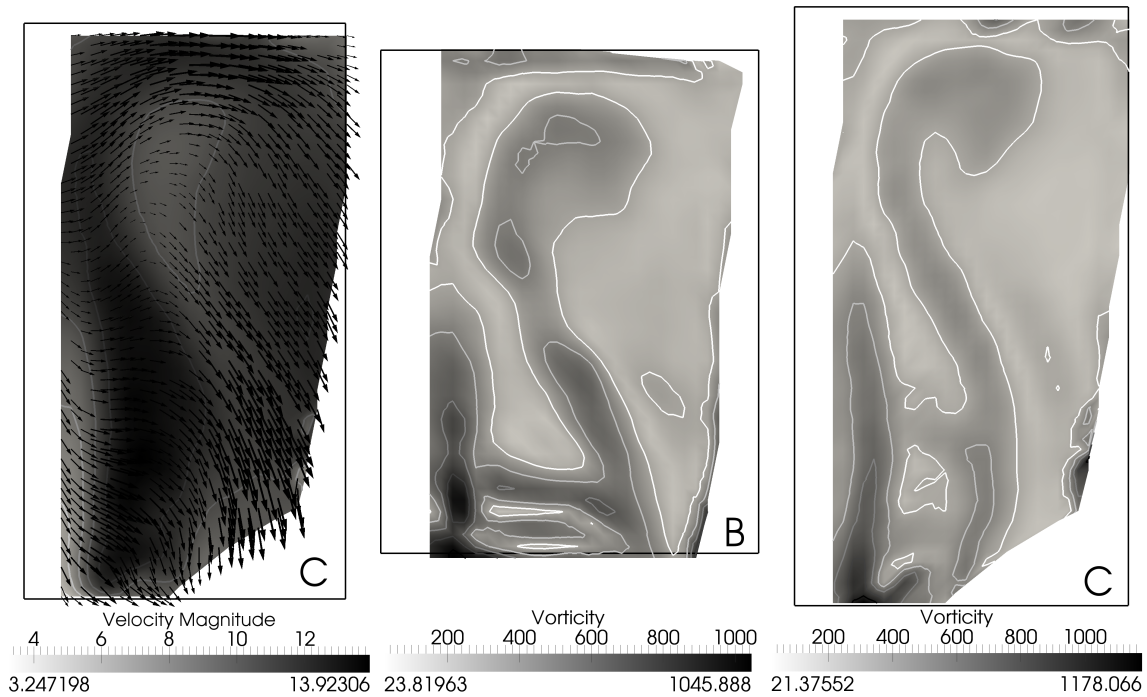


Abb. 8: Die Absolutgeschwindigkeit mit Sekundärströmung über der Zunge für $\varphi = 0,23$ (links). Mitte und rechts die Vortizität (1/s) für den gleichen Betriebspunkt über dem Trommelläufer und der Zunge. Isolinen der Vortizität in 200/s Schritten.

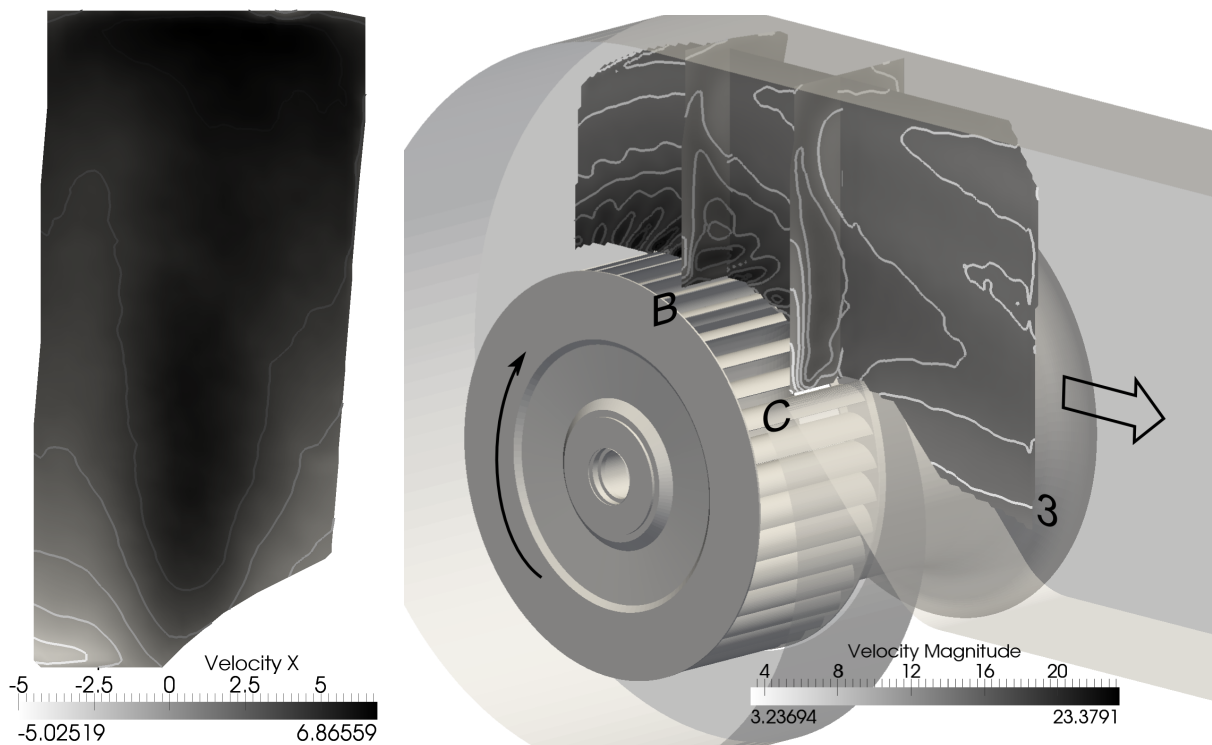


Abb. 9: Die Hauptströmung über der Zunge für $\varphi = 0,08$.

Abb. 10: Die Absolutgeschwindigkeit für alle Messebenen bei $\varphi = 0,23$ zusammen gezeigt.

Die Komplexität der Strömung ist jedoch nicht nur auf die Sekundärströmung beschränkt. Betrachtet man lediglich die Hauptströmungskomponente im Drosselbereich über der Zunge, so lässt sich eine Rückströmung zum Ventilator ausmachen (Abb. 9). Dies tritt bei beiden im Dros-

selbereich untersuchten Betriebspunkten auf, die Rückströmung ist für den niedrigsten Volumenstrom jedoch am größten. Eventuell rührt diese Rückströmung von der Trennung der Strömung durch die Zunge, ein Teil fließt wieder in die Spirale, der andere Teil in den Auslass. Vergleicht man die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen Ebenen bezüglich ihrer Absolutgeschwindigkeit untereinander (Abb. 10), lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung ausmachen.

Vergleich mit der numerischen Strömungsmechanik

Parallel zum Experiment wird der gleiche Aufbau (in Bezug auf das Laufrad und Gehäuse) mit verschiedenen numerischen Methoden untersucht, wobei Art und Umfang der Turbulenzmodellierung variieren. Der Vergleich Experiment-Simulation dient dabei der Validierung der Simulationen anhand der komplexen Sekundärströmung und soll hier exemplarisch für $\varphi = 0,23$ im Querschnitt über dem Ventilator gezeigt werden (Abb. 11).

Alle Simulationen verwenden das gleiche 12,5 Millionen Polyederzellen Netz und sind genauer in Darvish und Frank (2013) beschrieben. Die Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Parameter wie Zelltyp und Turbulenzmodell sind das Ergebnis einer vorausgegangenen Untersuchung, bei der analysiert wurde, welche Parameter die Kennlinie am besten berechnen (Darvish und Frank 2012). Die beste Kombination für RANS Simulationen war dabei die Kombination des $k-\omega$ -SST Modells mit Polyederzellen¹. Sie verwenden den stationären Frozen Rotor Ansatz, bei dem die Rotorposition fest ist und die auftretenden Kräfte modelliert werden, vergleiche Carolus (2013) und CD-adapco (2012). Die instationäre RANS (URANS) und Detached Eddy Simulation dagegen simulieren die Ventilatorbewegung mit $0,25^\circ$ pro Zeitschritt (Rigid Body Motion, CD-adapco 2012). Während alle Simulationen für diesen Betriebspunkt eine vergleichbare Absolutgeschwindigkeit zeigen – und dementsprechend auch die Abweichungen zum Experiment stets im Bereich von ± 2 m/s liegen – lösen die URANS und Detached Eddy Simulation die Sekundärströmung deutlich besser auf. Die beiden letztgenannten sind dabei Momentanaufnahmen, die Betrachtung der instationären Daten zeigt jedoch, dass die Strömung hauptsächlich nahe am Rotor variiert.

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von Stereo PIV erfordert hier zwar einen relativ komplexen Aufbau, liefert dafür aber Informationen über das Geschwindigkeitsfeld innerhalb des Gehäuses. Insbesondere die komplexe Sekundärströmung konnte über die Kennlinie untersucht werden. Dabei verändert sich das Muster stetig, die größte Änderung findet jedoch bei Erreichen des Best Efficiency Point statt. Laut Roth (1981) hat die Sekundärströmung einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Es konnte hier gezeigt werden, dass um die Sekundärströmung korrekt zu berechnen, die Verwendung komplexerer Methoden als RANS erforderlich ist. Die Änderung der Sekundärströmung steht daher eventuell in Zusammenhang mit vorher gemachten Erfahrungen, dass insbesondere im Drosselbereich die Verwendung von URANS schon allein für die Betriebspunktberechnung vorzuziehen ist (Darvish und Frank 2012).

Dankesworte

Das Projekt Numerische und Experimentelle Geräusch-Optimierung von Trommelläufer-Ventilatoren (NEGOT, FKZ: 17067X10) wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. CD-adapco gebührt ebenso Dank für die freundliche Unterstützung mit STAR-CCM+-Lizenzen.

¹Wobei ein 4,5 Millionen Zellen Netz für die Kennlinie prinzipiell ausreichend war, die DES erfordert jedoch eine bessere Diskretisierung.

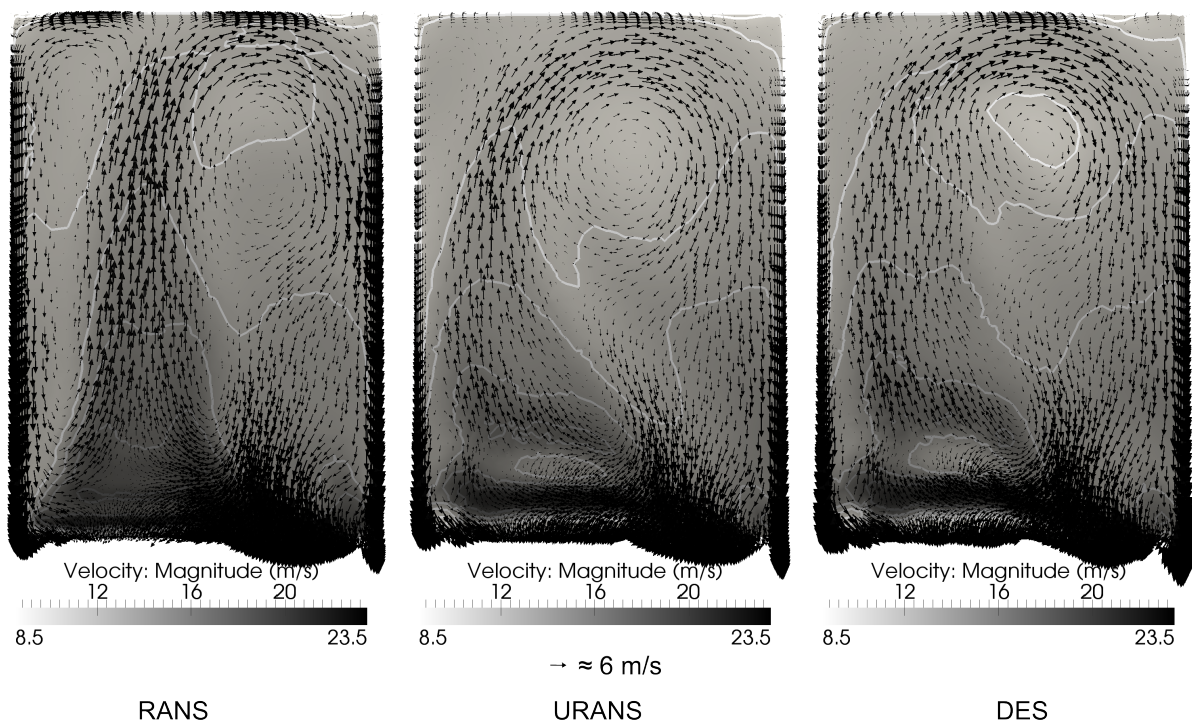


Abb. 11: Die Ergebnisse der numerischen Strömungsmechanik für die Ebene B, die Geschwindigkeits-skala wurde zum besseren Vergleich an die des Experiments angepasst.

Literatur

- Carolus, T., 2013: Ventilatoren, Aerodynamischer Entwurf, Schallvorhersage, Konstruktion. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- CD-adapco, 2012: User Guide. STAR-CCM+ Version 7.04.006. Melville, NY, USA
- Darvish, M., Frank, S., 2012: Sirocco Fan Modelling: from Selecting a Proper Turbulence Model to the Influence of the Cell Shape. FAN 2012, Senlis, FR, 18. - 20. April 2012
- Darvish, M., Frank, S., 2013: Numerical Investigations on the Noise Characteristics of a Radial Fan with Forward Curved Blades. STAR Global Conference 2013, Orlando, FL, USA, 18. - 20. März 2013
- Fitzner, K., 2008: Rietschel, Raumklimattechnik, Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Frank, S., Darvish, M., Tietjen, B., 2012: 3D Strömungsvisualisierung an einem Sirocco Ventilator mit Hilfe von Particle Image Velocimetry und numerischer Simulation. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Ilmenau 6. - 8. September 2011
- Frank, S., Darvish, M., Tietjen, B., Stuchlik, A., 2012: Design Improvements of Sirocco Type Fans by Means of Computational Fluid Dynamics and Stereoscopic Particle Image Velocimetry. FAN 2012, Senlis, FR, 18. - 20. April 2012
- ILA - Intelligent Laser Applications GmbH, 2004: VidPIV. Introduction to VidPIV. User Manual. Jülich, DE
- Klemm, T., 2005: Numerische und experimentelle Untersuchungen an Ventilatoren mit hoher Leistungsdichte. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
- Kwon, E.-Y., Baek, K.-W., Cho, N.-H., Kim, H.-K., Jung, I.-J., 2001: Some Aerodynamic Aspects of Centrifugal Fan Characteristics of an Automotive HVAC Blower. SAE 2001 World Congress, Detroit, MI, USA 5. - 8. März 2001
- Prasad, A.K., 2000: Stereoscopic Particle Image Velocimetry. Experiments in Fluids 29, 103 - 116
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007: Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Roth, H.W., 1981: Optimierung von Trommelläufer-Ventilatoren. Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen 29, 1 - 45. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH)
- Ziererp, J., Roth, H.W., Leist, H., 1979: Untersuchungen an Trommelläufer-Ventilatoren: Abschlussbericht des Forschungsvorhabens. Forschungsvereinigung für Luft- und Trocknungstechnik (FLT) e.V., Frankfurt am Main