

## **3D STRÖMUNGSVISUALISIERUNG AN EINEM SIROCCO VENTILATOR MIT HILFE VON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UND NUMERISCHER SIMULATION**

### **3D FLOW VISUALIZATION OF A SIROCCO TYPE FAN BY MEANS OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AND NUMERICAL FLOW SIMULATION**

**Stefan FRANK, Manoochehr DARVISH und Bastian TIETJEN**

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin  
Wilhelminenhofstr. 75 A, 12459 Berlin  
stefan.frank@htw-berlin.de

Schlagworte: Trommelläufer, Stereo PIV, CFD, unstrukturierte Gitter, Turbulenzmodelle  
Key Words: Sirocco Type Fan, Stereo PIV, CFD, Unstructured Grids, Turbulence Models

#### **Zusammenfassung**

Die Ergebnisse von numerischen Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) werden in der Regel mit integral gemessenen Werten wie Druck, Durchfluss oder Leistung, zunehmend aber auch mit gemessenen Geschwindigkeitsfeldern evaluiert. Im vorliegenden Fall der Innenströmung im Spiralgehäuse eines Sirocco Ventilators können Particle Image Velocimetry Messungen mit einer Kamera (2D PIV) relativ einfach vorgenommen und dem Vergleich mit Werten der Numerik zugeführt werden. Dabei zeigt sich sowohl qualitativ als auch quantitativ eine hohe Übereinstimmung. Stereo PIV-Messungen zur Bestimmung des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes erfordern hingegen einen höheren Aufwand und können nicht das gesamte Feld der Innenströmung auflösen. Erste Auswertungen zeigen sowohl größere Bereiche hoher Übereinstimmung als auch Zonen mit erhöhten Abweichungen. Die Fortsetzung der Arbeiten wird hier weiteren Aufschluss bringen.

#### **Einleitung**

Sirocco Ventilatoren, auch Trommelläufer genannt, sind radiale Strömungsmaschinen mit zahlreichen kurzen, vorwärts gekrümmten Schaufeln (z.B. Eck, 1972; Roth, 1980). Aufgrund ihrer kompakten Baugröße und ihres relativ geringen, angenehmen Geräusches werden sie millionenfach in der Automobil- und Hausgeräte-Industrie eingesetzt. Nachteilig sind jedoch ihr geringer Wirkungsgrad und die schlechte Vorhersagbarkeit des Betriebsverhaltens. Experimentelle und numerische Methoden (PIV & CFD) sollen daher helfen, die beiden letztgenannten Punkte zu verbessern. Von Stuchlik et al. (2009, 2011) sind hierzu einige Ergebnisse mit 2D PIV und CFD mit hochwertigen strukturierten Gittern vorgestellt worden. Hierbei konnte bereits eine relativ gute Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Werten erzielt werden. Ziel dieser weiterführenden Untersuchungen ist es, zum einen 2D PIV-Messungen unter verbesserten Versuchsbedingungen durchzuführen (z.B. bezüglich Seeding und Reflexionen) und zum anderen die Anwendbarkeit von Stereo PIV für diese Art von Innenströmung in einem Ventilator-Gehäuse zu klären. Die experimentellen Ergebnisse werden den Daten der entsprechenden Strömungssimulationen gegenübergestellt. Die auftretenden Abweichungen sollen dabei identifiziert und mögliche Maßnahmen zu deren Vermeidung diskutiert werden.

## Messaufbau

Die experimentellen Untersuchungen werden an einem speziellen Ventilator-Prüfstand mit Drehzahl-variablen Antrieb durchgeführt. Zur Bestimmung der integralen Werte wie Volumenstrom, Differenzdruck und Leistung ist der Ventilator an einen saugseitigen Präzisions-Kammerprüfstand nach DIN 24163 angeschlossen (Hersteller: ILK Dresden). Durch eine dreifache Blendenmesstrecke und eine zweifache Druckkaskadierung kann die Unsicherheit für den Volumenstrom im Bereich von 10 bis 2.000 m<sup>3</sup>/h unter einem Prozent vom Messwert gehalten werden; für den Druck liegt der Wert dementsprechend bei weniger als einem halben Prozent. Beim Wirkungsgrad beträgt die Unsicherheit zwischen einem und sieben Prozent, je nach Auslastung des Drehmomentsensors. Das Spiralgehäuse und die Seitenwand bestehen aus Acrylglas, so dass zum einen der Laserlichtschnitt aufgespannt und zum anderen das Strömungsfeld mit den CCD-Kameras aufgenommen werden kann (s. Abb.1). Für die PIV-Messungen kommt ein Stereo System der Fa. ILA GmbH, Jülich zum Einsatz. Für das Seeding wird DEHS verwendet, welches über einen Druckluft-Aerosol-Generator und einen Zyklon in den Saugstutzen des Hilfsventilators im Kammerprüfstand geleitet wird. Damit liegt die Zuführung der Partikel 5 m stromauf der Messstrecke, wodurch eine sehr homogene Verteilung des Seedings erreicht wird. Ein störendes Beschlagen der Scheiben, wie es beim Seeding im Saugmund des Testventilators auftrat, ist so nicht mehr zu beobachten.

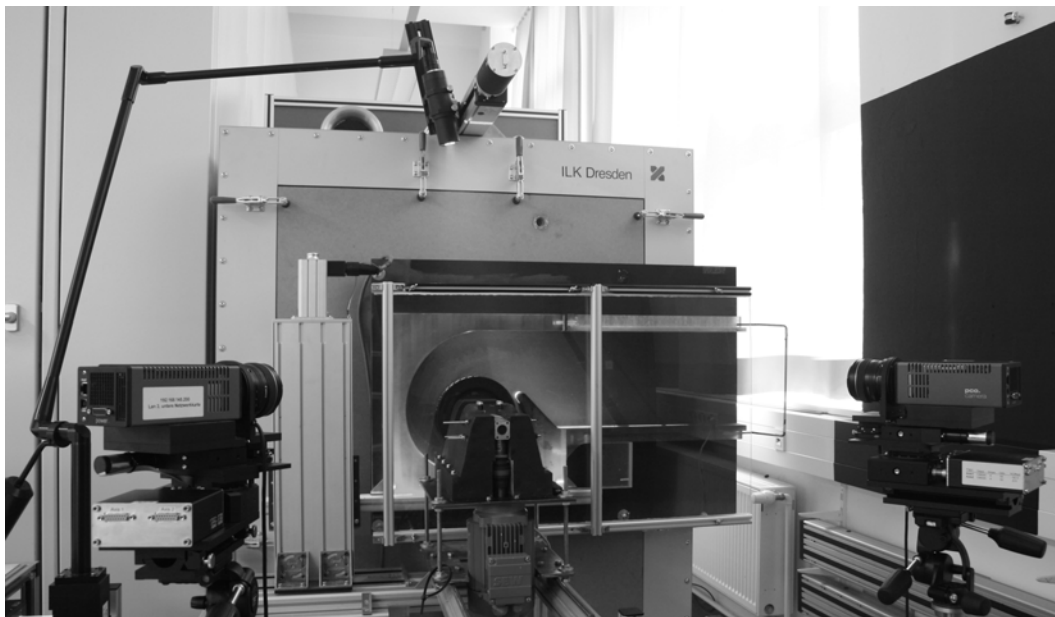


Abb. 1: Messaufbau für die Stereo Particle Image Velocimetry zur messtechnischen Bestimmung dreidimensionaler Geschwindigkeitsfelder. Zu sehen sind die beiden CCD-Kameras im Vordergrund, die transparente Spirale des Forschungs-Ventilators mit aufgespanntem Laser-Lichtschnitt im Zentrum und der Präzisions-Kammerprüfstand der HTW Berlin im Hintergrund des Bildes.

Zur Bestimmung der Übertragungsfunktion wird ein Kalibrier-Target in das Spiralgehäuse eingesetzt. In der Tiefe ist das Target über variable Abstandshalter fixiert, während es in der Lichtschnittebene über die Spirale exakt zentriert wird (s.a. Abb. 2). Für die Stereo PIV-Messungen erfolgt die Kalibrierung über die Tiefe des Lichtschnitts in drei verschiedenen Ebenen. Reflexionen des Laserlichtes am Spiralgehäuse können größere Probleme bei der Auswertung verursachen. Da eine Schwärzung des Gehäuses in der Regel keine Abhilfe bringt, wird in den betroffenen Bereichen eine Rhodamin-haltige Folie aufgeklebt. Durch die Absorption des grünen Laserlichtes und Emission im Orangen sind so auch in diesem Bereich Aufnahmen mit ausreichender Güte möglich.

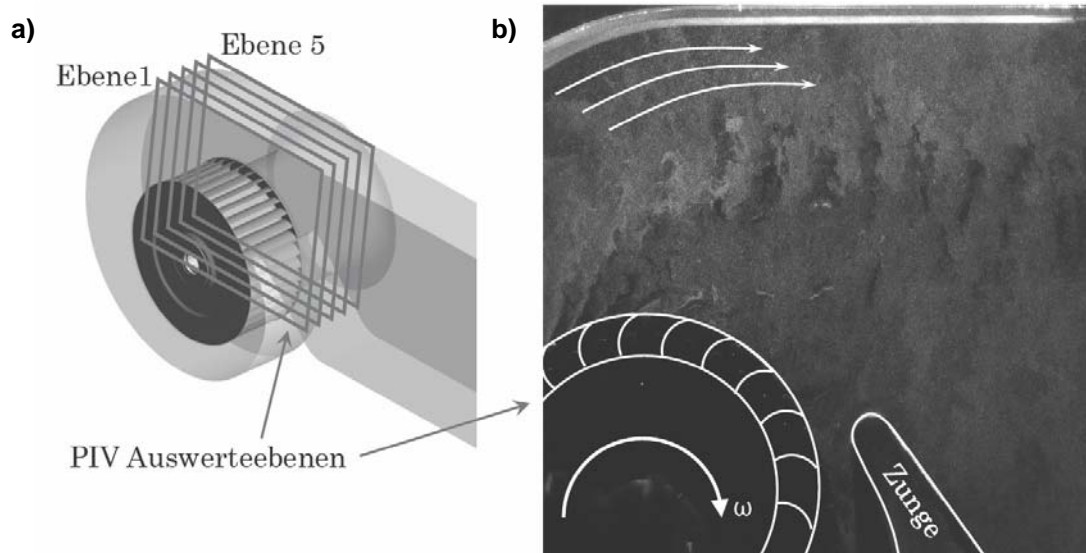


Abb. 2: a) Auswerteebenen für die PIV-Messungen (Stuchlik 2009).  
 b) Aufnahme der CCD-Kamera vom Ventilator mit Gehäuse, Rotor (D = 200 mm) und Zunge.

Je Betriebspunkt werden jeweils 100 Doppelbilder pro Kamera mit einer Frequenz von 5 Hz aufgenommen. Dabei sind die Aufnahmen nicht Drehwinkel-korreliert. Die Bildpaare werden einer Kreuz- und adaptiven Kreuzkorrelation, einer globalen und lokalen Filterung sowie der Interpolation von Ausreißern unterworfen. Anschließend werden die Ergebnisse über alle 100 Aufnahmen gemittelt.

### Numerische Strömungssimulation

Bei den numerischen Berechnungen kommt die kommerzielle Software Star CCM+ als Finite Volumen Methode zum Einsatz. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen werden in der Vernetzung jetzt bevorzugt unstrukturierte Gitter verwendet. Diese weisen bei gleicher erzielbarer Genauigkeit eine höhere Flexibilität gegenüber strukturierten Gittern auf. Die höheren Rechenzeiten werden i.d.R. durch den geringeren Vernetzungsaufwand mehr als kompensiert (Darvish et al., 2011). In einer Parameter-Studie sind verschiedene Zelltypen, Netzverfeinerungen und Turbulenz-Modelle untersucht worden. Als ideal haben sich die Verwendung von Polyeder-Zellen mit einer Zellanzahl von ca. vier Millionen und die Verwendung des Shear-Stress-Transport (SST)-Turbulenzmodells erwiesen. Dabei wird auf eine relative hohe Auflösung der Grenzschichten im Rotor geachtet, der dimensionslose Wandabstand  $y^+$  weist dort Werte zwischen eins und vier auf. Die instationäre Berechnung der Strömung hat in Bezug auf integrale Größen wie Druckaufbau oder Wellenmoment keinen Vorteil gegenüber stationären Berechnungen. Im Weiteren wird daher auf stationäre Simulationen mit einer bestimmten Stellung des Laufrades Bezug genommen (so genannte: "Moving Reference Frame MRF"). In Abb. 3a ist der prinzipielle Kennlinien-Verlauf eines Sirocco Ventilators dargestellt, während in 3b ein Vergleich zwischen numerischen Daten mit verschiedenen Turbulenzmodellen und experimentellen Daten gezeigt wird. Über einen weiten Bereich der Ventilator-Kennlinie können für die integralen Werte Druck und Wellenmoment Abweichungen von weniger als fünf Prozent gegenüber den experimentellen Werten erzielt werden (Darvish, 2010). Ein grundsätzlicher Vorteil der Strömungssimulation gegenüber experimentellen Verfahren besteht darin, dass die Feldgrößen wie Druck und Geschwindigkeit im gesamten Strömungsraum bestimmt werden. Da hier die Reynolds-gemittelte Navier-Stokes (RANS) Gleichung gelöst wird, können quasi nur die stationären, makroskopischen Wirbel gezeigt werden.

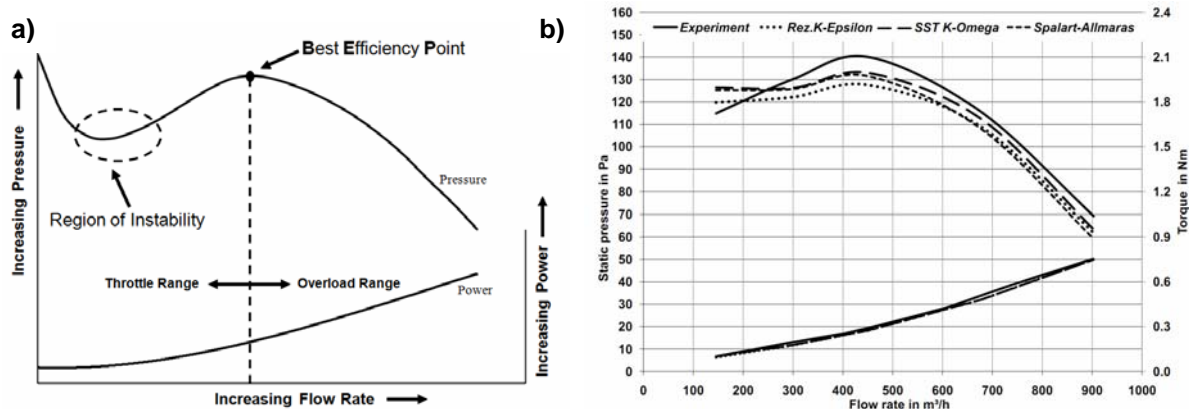


Abb. 3: a) Prinzipieller Verlauf der Kennlinie von Druck und Wellenleistung bzw. -moment  
 b) Vergleich von experimentellen und numerischen Ergebnissen für die Polyeder-Vernetzung

In der Auslegung von Sirocco Ventilatoren wird häufig davon ausgegangen, dass die Strömung ein nahezu zwei-dimensionales Verhalten aufweist. In Wirklichkeit ist die Strömung innerhalb des Rotors und zwischen Deckscheibe und Düse auch drei-dimensional (s.a. Roth, 1980). Zum Überblick zeigt Abb. 4 das globale Stromlinienbild aus der CFD-Simulation für den Bestpunkt des Ventilators, d.h. für einen Volumenstrom von  $450 \text{ m}^3/\text{h}$ , eine Drehzahl von  $n = 1.000 \text{ min}^{-1}$  und einen statischen Wirkungsgrad von ca. 60 %. Sehr gut ist die Wirbelströmung stromab der Zunge auf der Deckscheibenseite zu erkennen. Es können außerdem einzelne Stromlinien ausgemacht werden, die vom Rotoraustritt durch den Spalt zwischen Deckscheibe und Einlaufdüse (nicht dargestellt) zurück zum Rotoreintritt führen. Hierbei handelt es sich um Rückströmungen vom Rotoraustritt (also der Druckseite) über den Spalt der Eintrittsdüse zum Rotoreintritt. Bemerkenswert sind Literatur-Angaben, nach denen eine konstruktive Unterbindung dieser Spaltströmung zu einem weiteren Abfall des Wirkungsgrades führt. Anzunehmen ist, dass die Rückströmung die radiale Umlenkung der Strömung im Rotor unterstützt.

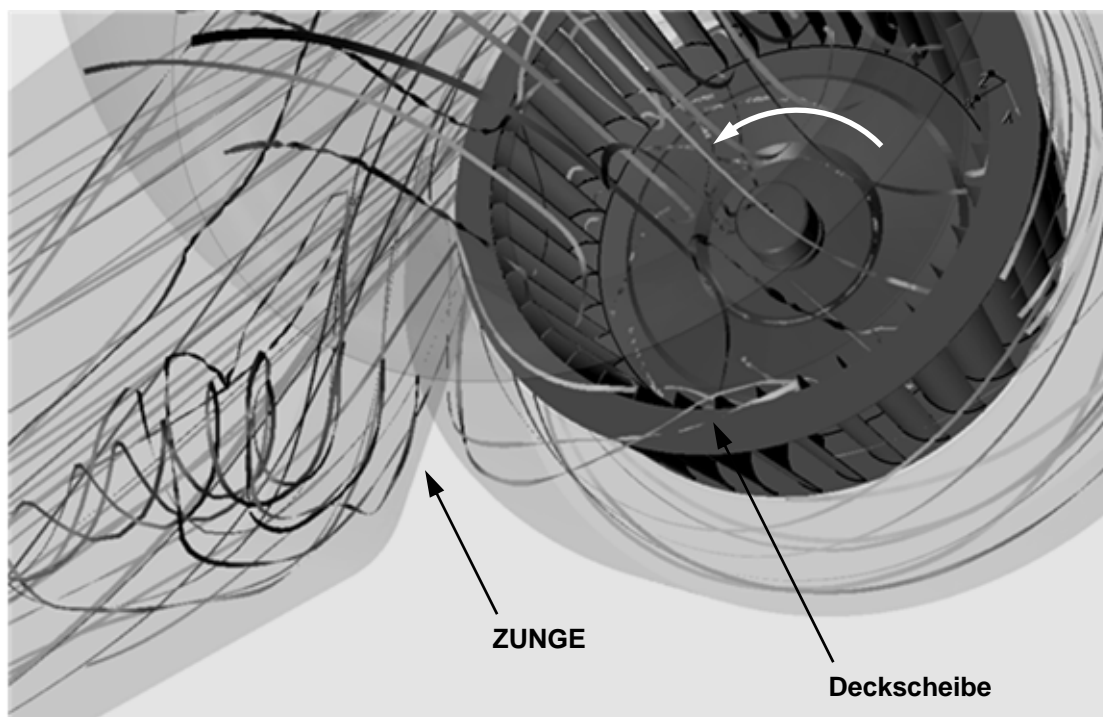


Abb. 4: Stromlinien aus der CFD im Bestpunkt bei  $n = 1.000 \text{ min}^{-1}$

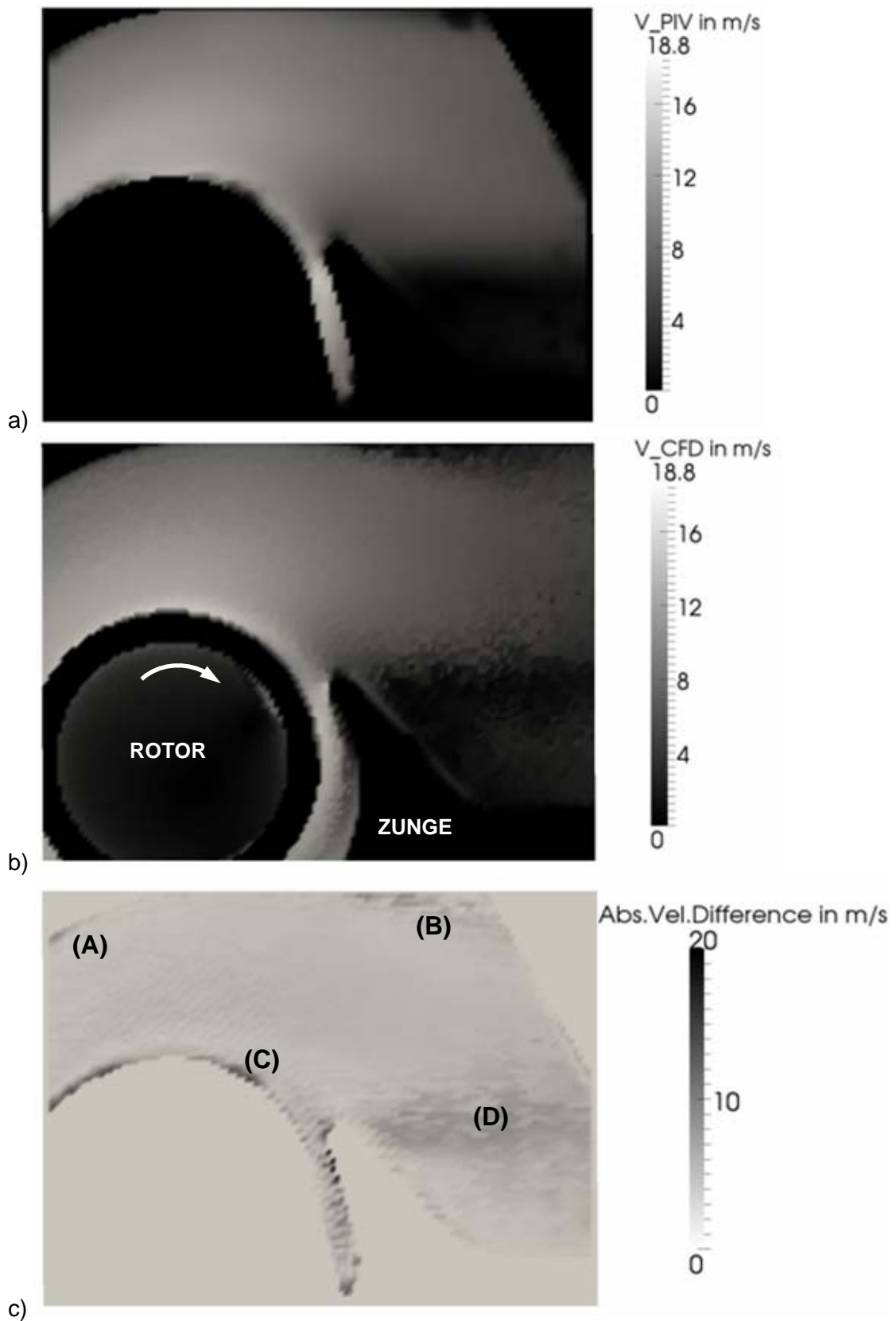


Abb. 5: 2D Strömungsfeld des Ventilators nahe der Deckscheibe (Ebene 5) im Bestpunkt bei einem Volumenstrom von  $450 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $n = 1.000 \text{ min}^{-1}$

a) Absolutgeschwindigkeit aus den 2D PIV-Messungen  
b) Absolutgeschwindigkeit aus der numerischen Simulation (CFD)  
c) Punktweise berechnete Differenzen aus a) und b)

## Vergleich der Ergebnisse

Zum Vergleich werden die Ergebnisse aus 2D PIV und CFD als Grauwert-Darstellungen in ParaView für den Bestpunkt des Ventilators einander gegenübergestellt (Abb. 5a und b). Dabei kann eine hohe qualitative Übereinstimmung zwischen den beiden Verfahren festgestellt werden. Um genauere Aussagen machen zu können, wird ein gemeinsames Auswertegitter für PIV und CFD erzeugt. Anschließend können die entsprechenden Differenzen der Absolutgeschwindigkeit Punktweise berechnet werden. Wie aus Abb. 5c ersichtlich ist, besteht in der Kernströmung auch quantitativ eine hohe Übereinstimmung. Die Gebiete mit höheren Abweichungen (A) bis (D) können in zwei Bereiche unterschieden werden: Zum einen sind dies die Randbereiche des Gehäuses (A) und (B) sowie des Rotors (C), in denen sich das reflektierte Laserlicht offenbar als Störquelle bemerkbar macht. Zum anderen ist die Zone (D) stromab der Zunge auffällig. Hier kann vermutet werden, dass die Abweichung aus dem Vergleich von Drehwinkel-gemittelten PIV-Messungen einerseits und Simulationsdaten für eine definierte Rotorstellung von  $0^\circ$  andererseits resultiert. Eine mögliche Abhilfe ist hier entweder in Drehwinkel-korrelierten PIV-Messungen oder instationär berechneten Simulationsdaten zu suchen.

Für die Stereo PIV-Messungen kommen zwei CCD-Kameras mit  $2048^2$  Bildpunkten und einer Linsen-Brennweite von 50 mm zum Einsatz. Die Kameras können dabei starr auf einer x,y,z-Traversiereinheit gekoppelt werden, während der Laserlichtschnitt auf einer z-Traversiereinheit montiert ist. Kameras und Lichtschnitt können so ohne Nachjustieren in der Tiefe verfahren werden, sobald die korrekten Einstellungen für die Kameras einmal gefunden sind. Zur Scharfstellung im gesamten Bildbereich kommen motorisierte Scheimpflug-Tiltadapter zur Anwendung. Der prinzipiell optimale Winkel der Kameras von  $45^\circ$  zur Lichtschnittebene kann hier nicht eingestellt werden, da ansonsten weite Bereiche der Gehäuse- und Zungenströmung einer 3D-Auswertung nicht zur Verfügung stehen. In der Praxis hat sich als Kompromiss ein Kamerawinkel von 20 bis  $25^\circ$  herausgestellt. Der Lichtschnitt hat eine Dicke von etwa fünf mm im Zentrum des Bildes. Aufgenommen werden wiederum 100 Doppelbilder mit einer Wiederholfrequenz von 5 Hz.

Die Auswertungen der Stereo PIV-Messungen sind noch nicht abgeschlossen, daher wird nachfolgend der bisherige Arbeitsstand zur Diskussion gestellt. Zur besseren Orientierung ist die  $v_z$ -Komponente aus der CFD nahe der Deckscheibe (Ebene 5) in Abb. 6a dargestellt. Abb. 6b zeigt die z-Komponente der Absolutgeschwindigkeit eines typischen Einzelbildes der Stereo PIV-Messungen. Dabei können nur die Bereiche ausgewertet werden, die von beiden Kameras als Schnittmenge gemeinsam gesehen werden. Damit sind immer noch einige potenziell interessierende Bereiche stromab der Zunge trotz des relativ kleinen Kamerawinkels einer Auswertung nicht zugänglich. Wie erwartet, weisen weite Bereiche der Kernströmung nur eine relativ geringe z-Komponente der Geschwindigkeit auf, die Strömung ist quasi zweidimensional. Auffällig sind jedoch Zonen nahe dem Rotoraustritt und am Gehäuse, welche relativ hohe  $v_z$ -Werte mit wechselndem Vorzeichen aufweisen. Dieses Phänomen ist bei allen Messungen in einem Volumenstrombereich zwischen 150 und  $900 \text{ m}^3/\text{h}$  zu beobachten. Interessanterweise stellen sich diese Zonen in der CFD homogener und mit kleineren  $v_z$ -Werten dar (Abb. 6c). Im Weiteren ist daher zu klären, wie die Unterschiede in den Bildern zu bewerten sind.

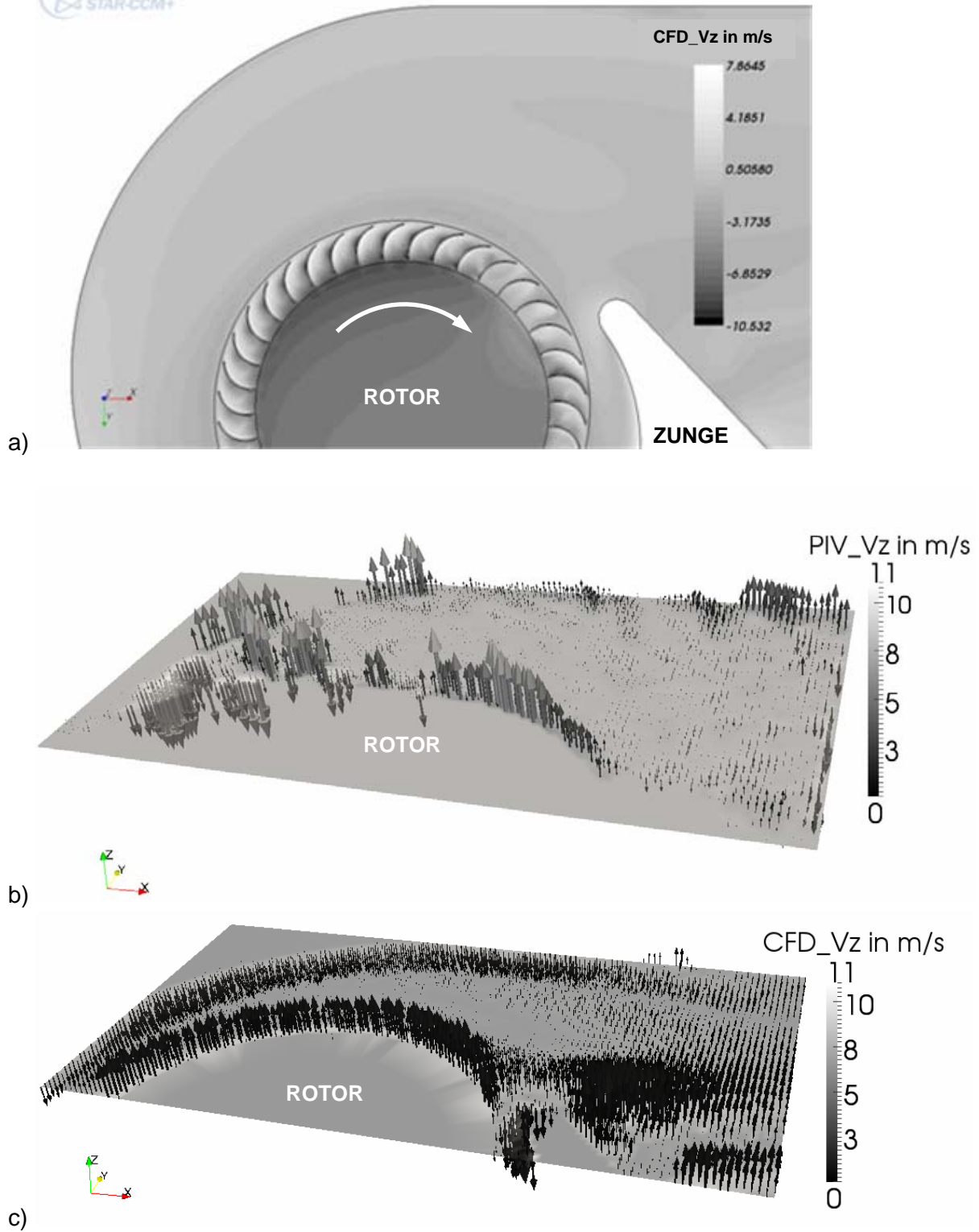


Abb. 6: Strömungsfeld des Ventilators nahe der Deckscheibe (Ebene 5), im Bestpunkt bei einem Volumenstrom von  $450 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $n = 1.000 \text{ min}^{-1}$

a)  $v_z$ -Komponente (skalar) der Absolutgeschwindigkeit aus der CFD  
 b)  $v_z$ -Komponente (vektoriell) aus einer typischen Stereo PIV Messung  
 c)  $v_z$ -Komponente (vektoriell) aus der numerischen Simulation (CFD)

## Schlussfolgerungen

Neben den integralen Messwerten Druck und Wellenmoment dienen die Geschwindigkeits-Messwerte der PIV zur Evaluierung von numerischen Strömungssimulationen. Im Fall des Sirocco Ventilators mit seiner vorwiegend zweidimensionalen Strömung im Gehäuse können hierzu 2D PIV-Messungen herangezogen werden. Diese Messungen sind mit vergleichsweise niedrigem Aufwand durchzuführen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit der numerischen Simulation von angenommenen fünf Prozent und der Messunsicherheit der PIV-Messungen in der gleichen Größenordnung (s. z.B. Heilmann, 2005) kann von einer sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse beider Methoden gesprochen werden. An der Minimierung der Unsicherheiten sowie des Einflusses von Reflexionen wird weiter gearbeitet.

Die Durchführung von Stereo PIV-Messungen ist gegenüber 2D PIV-Messungen mit einem deutlich erhöhten Aufwand verbunden. Der ideale Kamerawinkel von  $45^\circ$  zur Lichtschnittebene kann nicht eingehalten werden, da sonst zu große Bereiche der Strömung abgeschattet sind und nicht ausgewertet werden können. Bei diesen Messungen ist deshalb ein Kamerawinkel von nur  $25^\circ$  realisiert worden. Dennoch sind hier relevante Bereiche der Zungenumströmung abgeschattet und daher nicht auswertbar. Erste Darstellungen zeigen in bestimmten Bereichen nahe dem Rotor eine zusätzliche z-Komponente der Geschwindigkeit. Diese lässt sich durch die vorliegenden Strömungssimulationen bislang leider nicht durchgängig bestätigen. Die Auswertungen werden daher diesbezüglich fortgesetzt.

## Dankesworte

Die Untersuchungen sind im Rahmen der vom BMBF geförderten und von der AiF betreuten Forschungsprojekte NUBAT FKZ 17N1507 und NEGOT FKZ 17067X10 an der HTW Berlin durchgeführt worden. Die Laboreinrichtung wurde zum Teil aus dem Projekt EFRE IMPACT finanziert. Der Hauptautor konnte die Messungen im Winter 2010/11 im Rahmen eines von der HTW Berlin gewährten Forschungssemesters durchführen.

## Literatur

Eck, B.: Ventilatoren, 5. Auflage, Springer-Verlag, 1972.

Darvish, M.: Numerical Investigations on the Performance Characteristics of Radial Fans with Forward Curved Blades by means of CFD. Master Thesis, HTW Berlin, 2010.

Darvish, M.; Frank, S.: Numerical Investigations on the performance characteristic of Sirocco fans by means of Computational Fluid Dynamics. Star European Conference, Noordwijk aan Zee/NL, 2011.

Heilmann, C.: Strömungsentwicklung längs der Peripherie eines Seitenkanalverdichters, Dissertation, TU Berlin, 2005.

ParaView User's Guide (V. 3.10)

Roth, H.W.: Optimierung von Trommelläufer-Ventilatoren, Dissertation, TH Karlsruhe, 1980

Star CCM+ 5.04 User Manual. CD Adapco.

Stuchlik, A.; Frank, S.: Validierung Numerischer Simulationen an Trommelläufer-Ventilatoren mit Hilfe der Particle Image Velocimetry. In: GALA Fachtagung, S. 502, Erlangen, 2009.

Stuchlik, A.; Frank, S.: Numerische Berechnung und Auslegung von Trommelläufer-Ventilatoren. Schlussbericht zum gleichnamigen BMBF/AiF-Forschungsvorhaben FKZ 17N1507. HTW Berlin, 2011.

VidPIV 4.6 Manual. ILA GmbH, Jülich.