

VALIDIERUNG NUMERISCHER SIMULATIONEN AN TROMMELLÄUFER-VENTILATOREN MIT HILFE DER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

VALIDATION OF NUMERICAL CALCULATIONS ON SIROCCO FANS BY MEANS OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Adam Stuchlik, Stefan Frank

HTW Berlin, FB2

Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin

adam.stuchlik@htw-berlin.de

Trommelläufer, numerische Strömungssimulation, laseroptische Geschwindigkeitsmessung
Sirocco fan, Computational Fluid Dynamics CFD, Particle Image Velocimetry PIV

Zusammenfassung

Das Ziel dieses Beitrages ist die Untersuchung und das Verstehen der komplexen Strömungsvorgänge in Trommelläufer-Ventilatoren mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD). Dies wird ergänzt durch integrale und laseroptische Messungen (Particle Image Velocimetry, PIV) an einem Präzisions-Kammerprüfstand nach DIN 24163. Hierdurch können die gemessenen Kennlinien in guter Genauigkeit nachgerechnet sowie die Strömungsfelder innerhalb des Spiralgehäuses des Trommelläufer-Ventilators qualitativ und quantitativ verglichen werden.

Einleitung

Trommelläufer Ventilatoren bestehen aus einem radialen Laufrad mit kurzen vorwärtsgekrümmten Schaufeln und einem Spiralgehäuse. Sie sind industriell weit verbreitet, z.B. in gebäude- oder automobiltechnischen Klima- und Lüftungsanlagen (HVAC) oder anderen Bereichen, in denen hoher Luftmassentransport, geringe Abmessungen und / oder Betriebsgeräusche gefordert sind. Ihre Nachteile sind vergleichsweise geringe Wirkungsgrade und die Notwendigkeit einer empirischen Auslegungsmethodik. Letzteres resultiert u.a. aus dem Umstand, dass Trommelläufer-Ventilatoren sich nicht mit Hilfe der Euler – Strömungsmaschinen – Hauptgleichung berechnen bzw.

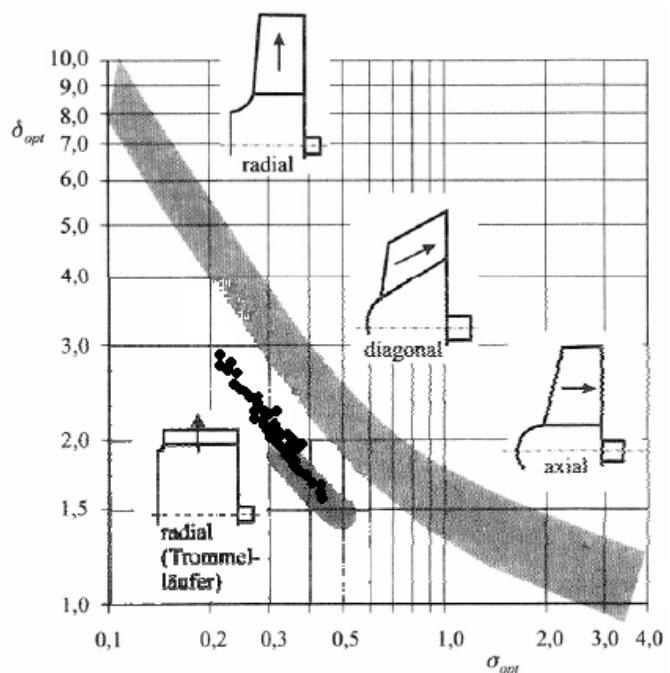


Abb. 1: Cordier-Diagramm /CAROLUS/
(schwarze Punkte: eigene Messwerte)

auslegen lassen. Dies lässt sich auch dadurch aufzeigen, dass Trommelläufer-Ventilatoren, neben den Seitenkanalverdichtern, im Cordier-Diagramm ein Band abseits der gängigen Strömungsmaschinen aufspannen (Abb. 1). Die Strömung in Trommelläufer-Ventilatoren ist überwiegend instationär, voll turbulent und dreidimensional. Darüber hinaus treten, selbst im Bestpunkt, prinzipiell unvermeidbare Ablöse- und Totwassergebiete in den Schaufelkanälen sowie im Spiralgehäuse auf.

Prüfstand

Mit Hilfe eines selbstkonzipierten multifunktionalen Ventilatorprüfstandes (Abb. 2) /LÜCKEMANN/ werden mehrere verschiedene Laufräder (Durchmesser 160...200 mm, Breite 62...82 mm) auf deren Betriebsverhalten hin untersucht. Dies geschieht in einem 87 mm breiten Spiralgehäuse in unterschiedlichen Laufradpositionen bei variierenden Drehzahlen. Der Einfluss des Laufrad-Zunge-Abstandes, des Laufrad-Gehäuse-Breitenverhältnisses, der Drehzahl und der Laufradabmessungen auf das Betriebsverhalten wird auf diese Weise untersucht.

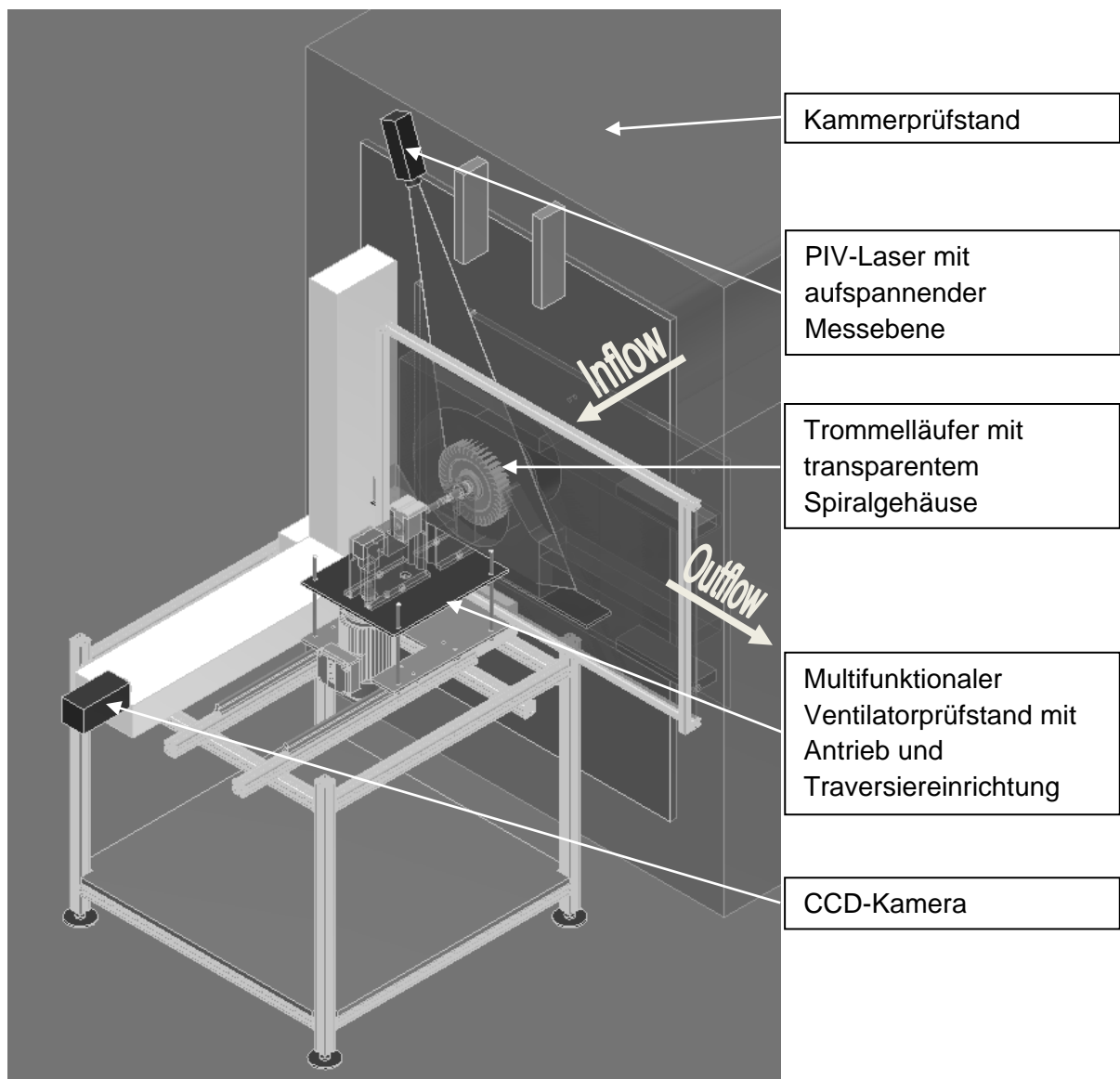


Abb. 2: Multifunktionaler Ventilatorprüfstand

Um PIV-Messungen zu ermöglichen, wird das Spiralgehäuse aus dem Vollen eines Acrylglasblockes gefräst und ein Spiralboden aus Glas eingesetzt. Die bearbeiteten Flächen werden anschließend bis zur maximal erreichbaren optischen Güte poliert. Dies stellt den notwendigen optischen Zugang für die vom Laser aufgespannte Messebene sowie die orthogonal stehende CCD-Kamera zur Verfügung.

Der gesamte Antriebsstrang des Trommelläufers ist verfahrbar ausgeführt. Auf diese Weise kann der Trommelläufer zeitsparend ohne Änderung sonstiger geometrischer Bezüge aus dem Spiralgehäuse entfernt werden. Da die bei der Particle Image Velocimetry zugegebenen Partikel nach einer gewissen Betriebszeit das Gehäuse verunreinigen, kann dieses somit zeitsparend und effektiv gereinigt werden.

Numerische und experimentelle Ergebnisse

Auf Basis der erstellten CAD-Daten des Ventilatorprüfstandes werden numerische Modelle eines Trommelläufer-Ventilators samt Spiralgehäuse generiert. Bei Voruntersuchungen werden mehrere Gitterauflösungen bezüglich ihres Einflusses auf die errechneten Werte hin überprüft. Die größte generierte Gesamt-Knotenzahl liegt bei ~13 Millionen Knoten. Nach Durchführung der Gitterunabhängigkeitsstudie wird für den vorliegenden Anwendungsfall ein strukturiertes Gitter mit insgesamt vier Millionen Knoten erstellt. Eine weitere Verfeinerung des Gitters hat nur vernachlässigbar geringe Änderungen der errechneten Werte zur Folge. Abb. 3 & 4 zeigen ausgewählte Ansichten des verwendeten numerischen Modells sowie des generierten numerischen Gitters. Dabei liegt die Knotenverteilung Laufrad / Gehäuse bei ungefähr 2:1. Der dimensionslose Wandabstand y^+ liegt je nach Region bei 2...30. Dies ist nötig, da bei größerer Wandauflösung entstehende Ablöse- und Wiederanlegezonen nur unpräzise berechnet werden können.

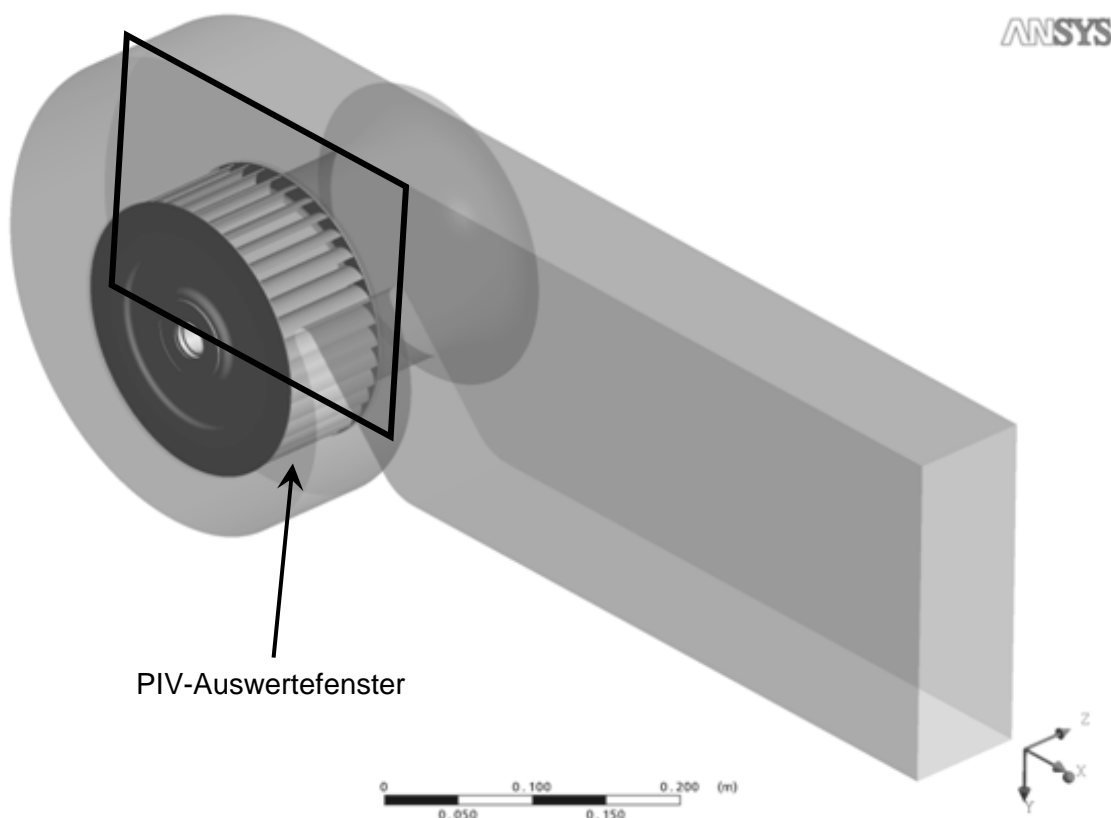


Abb. 3: Ansicht CAD-Modell mit markiertem PIV-Auswertefenster

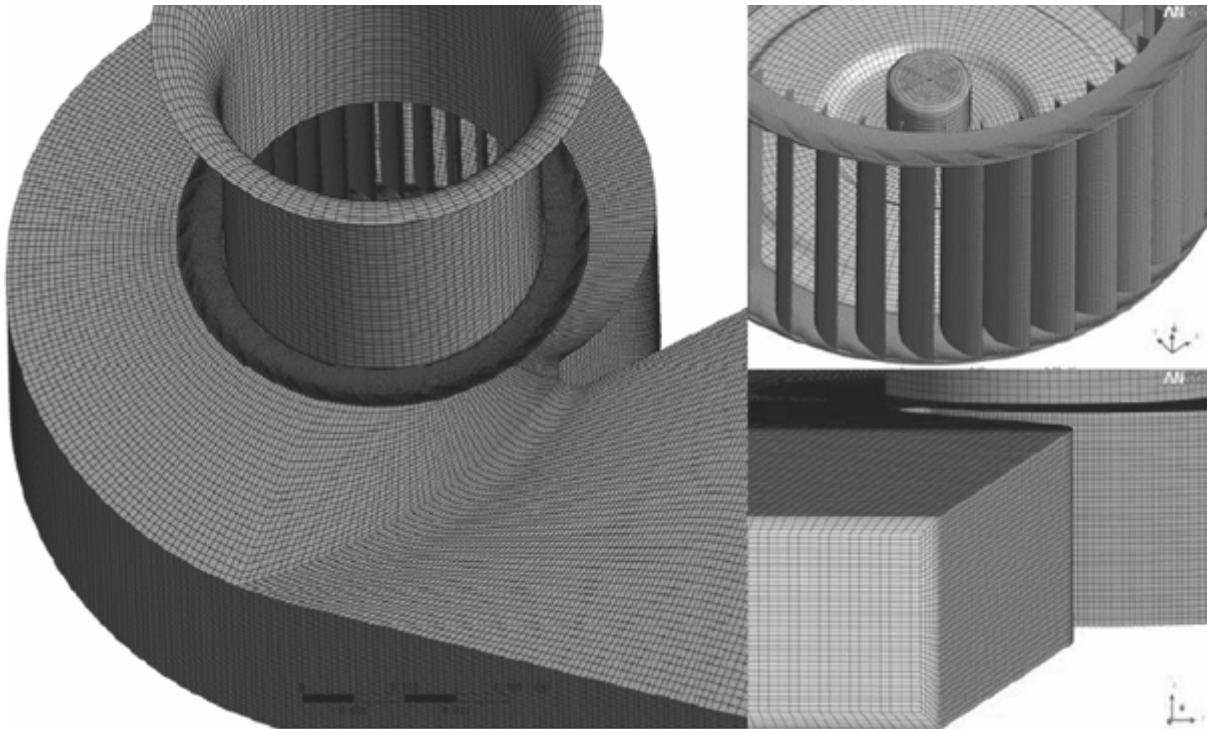


Abb. 4: Detailansichten numerisches Gitter mit ca. vier Millionen Knoten

Durch umfangreiche Voruntersuchungen im Bereich der Turbulenzmodellierung wird das relativ neue Shear–Stress–Transport (SST) Turbulenzmodell für diesen Anwendungsfall bezüglich der Rechengenauigkeit und -geschwindigkeit am geeignetsten befunden /SCHULZE/.

Die für die Validierung herangezogenen Berechnungen werden stationär mit Hilfe des Frozen-Rotor-Interfaces ausgeführt, da bei transienten Berechnungen eine unverhältnismäßig hohe Rechenzeit festgestellt wurde. Da bei dieser Vorgehensweise das Laufrad-Gitter jedoch nicht rotiert, entsteht unter Umständen ein durch die Schaufelstellung hervorgerufener, nicht vernachlässigbarer Fehler im Abbild des Strömungsfeldes. Dies muss gerade auch bei Gegenüberstellungen von vektoriellen Geschwindigkeitsfeldern berücksichtigt werden. Kompensiert wird dies mit Hilfe des Rotational-Offset. Die stationären Berechnungen werden hier für drei verschiedene Schaufelstellungen durchgeführt und dann gemittelt den experimentellen Werten gegenübergestellt.

Ausgewählte Betriebspunkte werden für eine Trommelläufer-Konfiguration bei verschiedenen Drehzahlen mit CFD nachgerechnet. Die berechneten integralen Druckwerte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zu den experimentell ermittelten Werten. Die sich ergebenden Abweichungen liegen bei unter fünf Prozent (Abb. 5). Für die laseroptischen Geschwindigkeitsuntersuchungen (PIV) wird eine Auswahl stabiler Betriebspunkte auf den Kennlinien nachgemessen. Auf diese Weise kann zugleich die Reproduzierbarkeit der Messungen des Kammerprüfstandes belegt werden. Dies wird durch die Kurvenscharen in dem Kennlinien-Diagramm deutlich. Wie dem Diagramm weiter zu entnehmen ist, ist bei dem verwendeten Kammerprüfstand der maximale Durchfluss auf 1000 m³/h begrenzt.

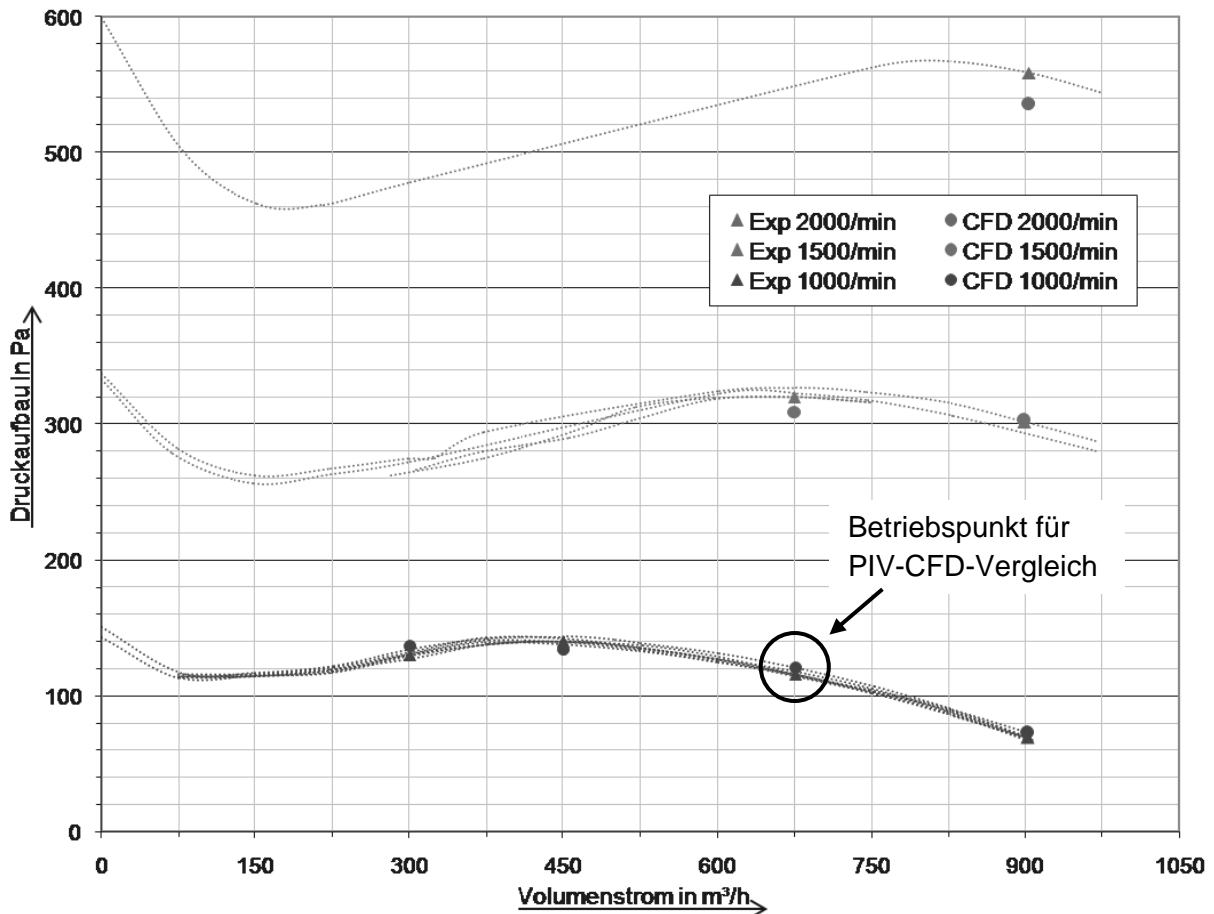


Abb. 5: Druck-Volumenstrom-Diagramm mit ausgewählten experimentellen Betriebspunkten und zugehörigen berechneten Werten (Markierung: Betriebspunkt für PIV-CFD-Vergleich)

Das Strömungsbild innerhalb des Spiralgehäuses des Trommelläufers wird innerhalb eines Auswertefensters in mehreren Ebenen parallel zum Spiralboden aufgenommen (siehe Abb. 3). Bezüglich der Funktions- und Arbeitsweisen von PIV-Systemen wird auf die Literatur verwiesen. Bei den hier durchgeführten Messungen kommt ein 2D-2C-System samt VidPIV 4.0-Software der Firma ILA zum Einsatz. Eine einzelne Messreihe besteht aus mit vier Hertz aufgenommenen 100 Doppelbildern. Die mit Hilfe von Algorithmen und Kreuzkorrelationsfunktionen ermittelten Partikelversätze werden von der Software als Geschwindigkeitsfelder grafisch aufbereitet dargestellt.

Dem hier exemplarisch gezeigtem PIV-Rohbild (Abb. 6) können anschauliche Informationen bezüglich des Strömungsfeldes entnommen werden (eingestellter Betriebspunkt markiert in Abb. 5). Hier sind deutlich die Abströmwinkel α zu erkennen, welche bei ca. 140° liegen, statt wie von der Schaufelgeometrie vorgegebenen 170° . Dies zeigt, dass die Metall- und Strömungswinkel in Trommelläufers mehr als in anderen Strömungsmaschinen von einander abweichen. Die Konzentration der Partikel zeigt weiter die (Un-) Gleichförmigkeit der Strömung.

Abb. 7 zeigt die auf der Messreihe aus Abb. 6 basierende von der PIV-Software ausgewertete Vektorgrafik. Die Nomenklatur der Aufnahmen liest sich wie folgt: Trommelläufer-Typ, Drehzahl, Trommelläufer-Position, Messebene, eingestellter Volumenstrom.

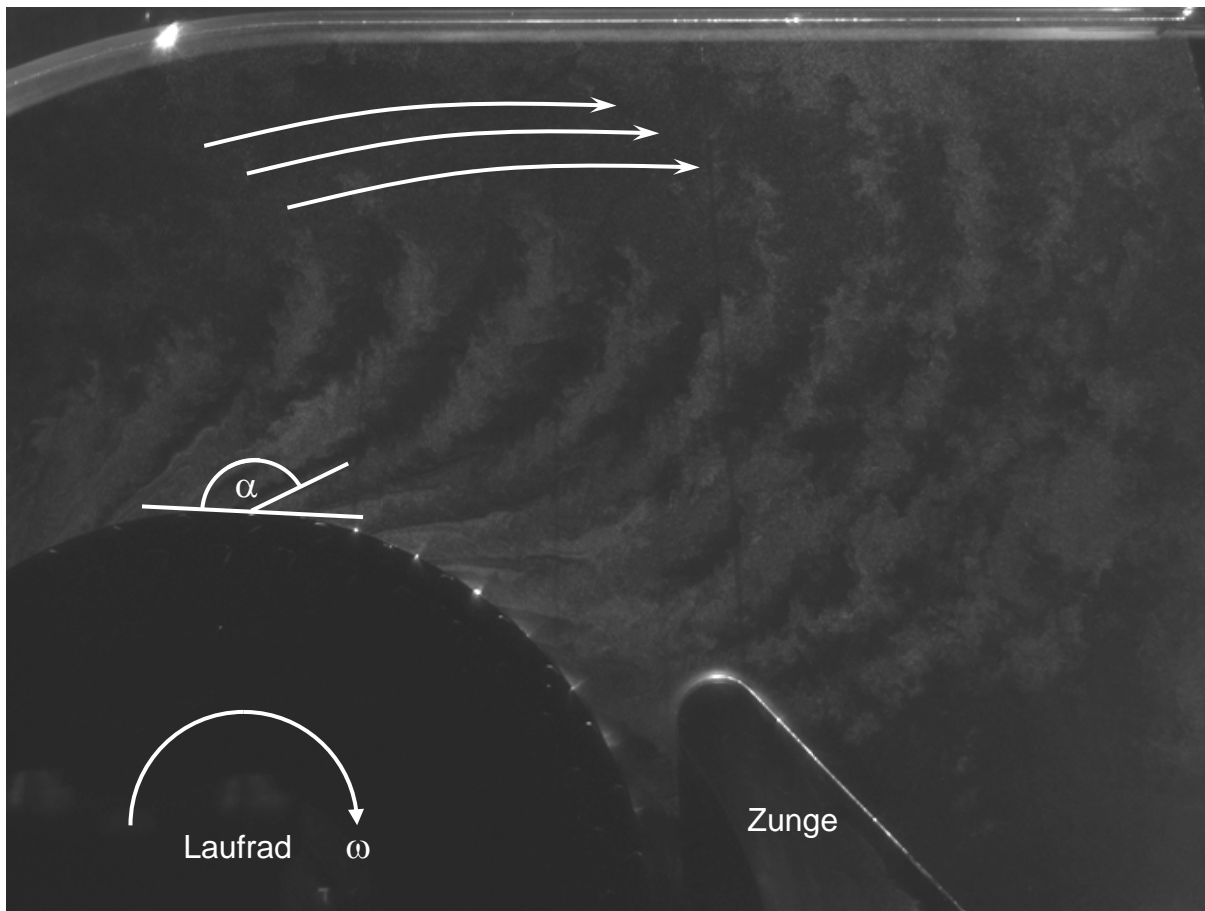


Abb. 6: Exemplarisches PIV-Rohbild (Bildausschnitt siehe Abb. 3)

Aus dem Postprozessor der CFD-Software werden analog zu den PIV-Messungen entsprechende Ebenen mit Geschwindigkeitsinformationen extrahiert. Abb. 8 zeigt das numerisch ermittelte Geschwindigkeitsfeld, ebenfalls basierend auf dem markierten Betriebspunkt (BP) aus Abb. 5. Wie eingangs bereits erwähnt werden Berechnungen für drei verschiedene Schaufelstellungen durchgeführt und die Ergebnisse im Anschluss gemittelt. Es lässt sich bereits bei näherem Hinsehen eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsfeld erkennen. Da eine gute visuelle Übereinstimmung allein noch keine Aussage über die Güte einer numerischen Simulation zulässt, werden die experimentell und numerisch ermittelten Geschwindigkeitsfelder differenziell gegenübergestellt. Durch ein selbstgeschriebenes Tool können die Geschwindigkeitsfelder sowohl in ihrem Betrag, als auch in ihrer Richtung von einander subtrahiert werden. Das auf diese Weise entstehende Geschwindigkeitsdifferenzbild lässt nun nicht nur eine quantitative sondern auch eine qualitative Aussage über die Güte der errechneten Ergebnisse zu. Dieses Differenzbild zeigt eine gute Übereinstimmung im Großteil des Strömungsraumes. Erhöhte Abweichungen im Bereich des Laufrades und der Zunge resultieren aus einer ungenügenden PIV-Datenrate. Dies lässt sich durch Abschattungs- und Reflexionseffekte oder eine für die Auswertung nicht ausreichende Partikeldichte erklären. Geringe Abweichungen links oben und rechts unten im Strömungsraum resultieren wahrscheinlich aus der Krümmung des Gehäuses bzw. durch den mit zunehmender Entfernung diffus werdenden Laserschnitt. In Anbetracht der auftretenden Unsicherheiten bei PIV-Messungen kann trotz allem von einer sehr guten Übereinstimmung der experimentellen und numerischen Werte gesprochen werden.

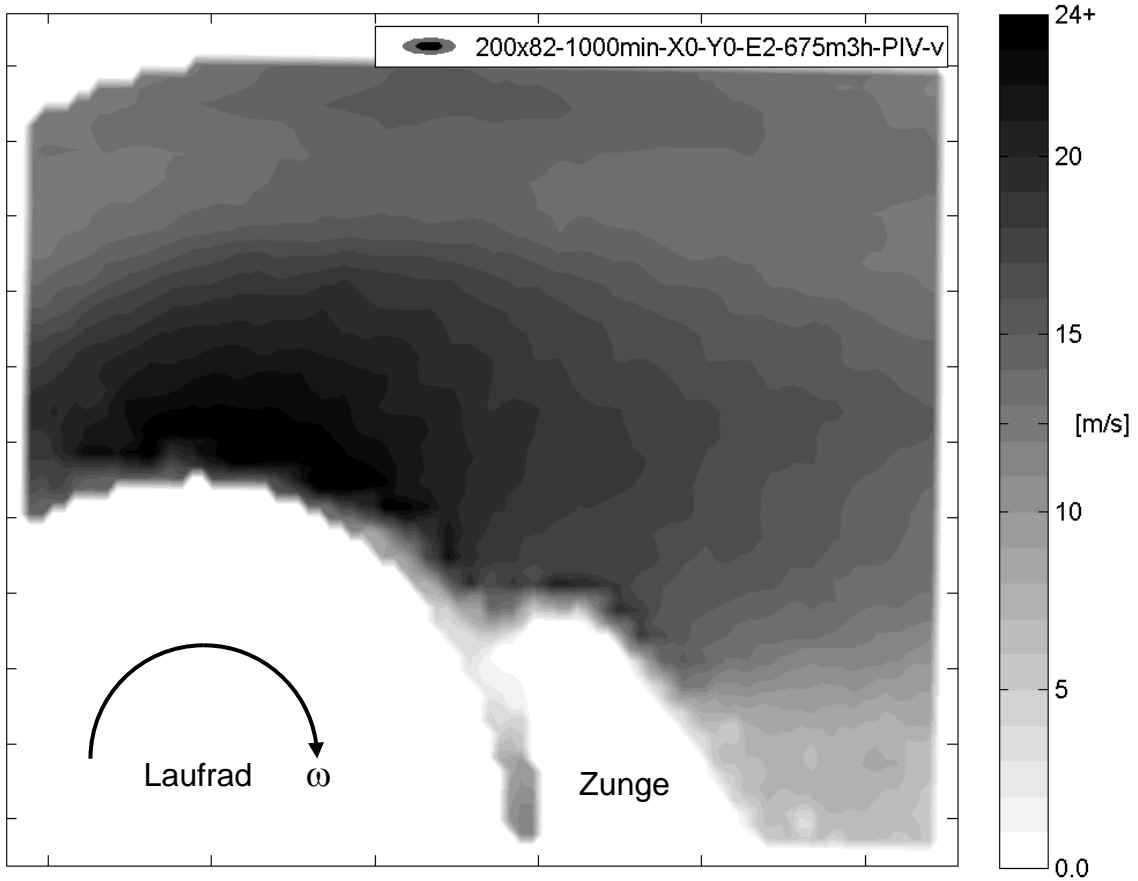


Abb. 7: Aus PIV-Messung (Abb. 6) ermitteltes Geschwindigkeitsfeld (BP siehe Abb. 5)

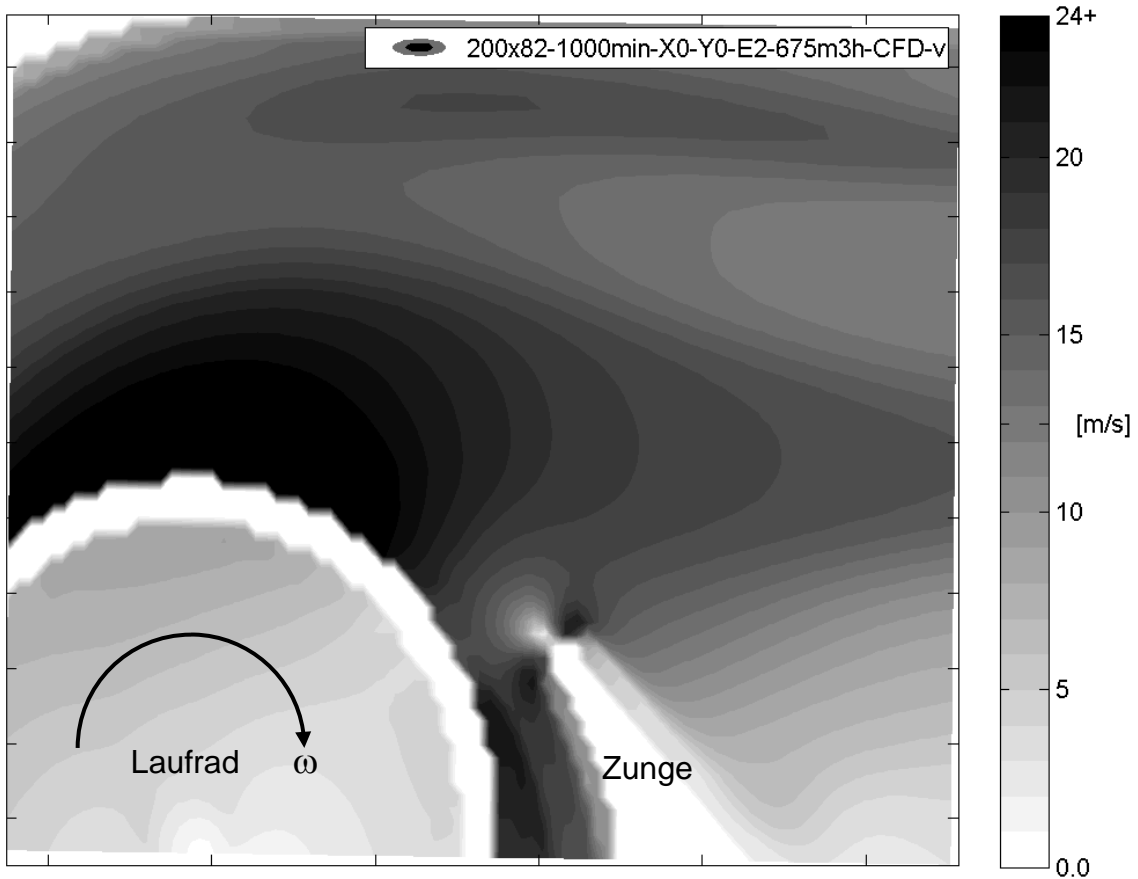


Abb. 8: Mit CFD ermitteltes Geschwindigkeitsfeld (BP siehe Abb. 5)

Schlussfolgerung & Ausblick

Bei sorgfältiger und bedachter Wahl der numerischen Parameter kann das Betriebsverhalten von Trommelläufer-Ventilatoren in einem weiten Betriebsbereich mit hinreichender Genauigkeit vorhergesagt werden. Die Gegenüberstellung der integralen Werte ergibt Abweichungen von unter fünf Prozent (Abb. 5). Gestützt wird dies durch die gute Übereinstimmung der mit PIV und CFD ermittelten Geschwindigkeitsfelder innerhalb des Strömungsraumes (Abb. 7 & 8).

Weitere Arbeiten im Projektteam befassen sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Schaufelzahlen / Profilierungen auf die Betriebscharakteristik von Trommelläufer-Ventilatoren sowie der evolutionstechnischen Optimierung des Spiralgehäuses.

Danksagung

Für die Ermöglichung der Durchführung des Forschungsprojektes dankt das "Numerische Berechnung und Auslegung von Trommelläufern (NUBAT)"-Team den Mittelgebern und Kooperationspartnern, besonders dem BMBF (FKZ: 17N1507), dem AIF, der Bosch Siemens Haushaltsgeräte GmbH, dem Fachgebiet FSD an der TU Berlin (Prof. Thamsen) sowie der CFX Berlin Software GmbH.

Literatur

Ansys Inc., CFX User Guide, Version 11 SP1

Carolus, Th.: Ventilatoren, Vieweg & Teubner Verlag, 2003

Dornstetter, S.: Numerische und experimentelle Untersuchungen an Querstromventilatoren, Dissertation, TH Karlsruhe, 2002

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

Heilmann, C.: Strömungsentwicklung längs der Peripherie eines Seitenkanalverdichters, Dissertation, TU Berlin, 2005. Mensch & Buch Verlag Berlin, 2005

ILA GmbH, VidPIV 4.0 Handbuch

Klemm, T.: Numerische und experimentelle Untersuchungen an Ventilatoren mit hoher Leistungsdichte, Dissertation, TH Karlsruhe, 2005

Lückemann, A.: Laseroptische Strömungsmessungen an Trommelläufern, Masterthesis, HTW Berlin, 2008/09

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

Schulze, S.: Vergleich von Turbulenzmodellen zur Berechnung radialer Laufräder mit vorwärts gekrümmten Schaufeln, Masterthesis, HTW Berlin, 2008