

Entwicklung eines Radialgebläses mit querschnittsvariablem Diffusor und Volute zur Wirkungsgradsteigerung im Teillastbetrieb

Development of centrifugal fan with variable cross-sectional area of diffusor and volute for efficiency increase in part load regime

S. Burgmann¹, T. Fischer², M. Rudersdorf¹, J. R. Seume²

¹Zentrum für Brennstoffzellen Technik GmbH (ZBT), Carl-Benz-Straße 201, 47057 Duisburg

²Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9, 30167 Hannover

Brennstoffzellen-Kathodenluftversorgung, Kennfeld-erweiternde Maßnahmen, numerische Gebläseauslegung, PIV-Messung im Diffusor
fuel cell cathode air supply, means for performance increase, numerical design and performance prediction, PIV measurement within diffusor

Zusammenfassung

Das Kathodenluft-Gebläse eines Brennstoffzellensystems ist der größte elektrische Verbraucher im Gesamtsystem. Um über einen weiten Betriebsbereich des Gesamtsystems eine hohe Effizienz zu erreichen und eine stabile Kathodenluft-Versorgung zu gewährleisten, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den Wirkungsgrad bei Teillastbetrieb zu erhöhen und den stabilen Betriebsbereich des Gebläses zu erweitern.

In diesem Beitrag wird über eine betriebspunktabhängige Anpassung des Diffusorquerschnitts berichtet, welche das Betriebsverhalten insbesondere im Teillastbereich verbessert. Dies kann mit einer simplen Mechanik über die Verstellung der Diffusorrückwand erreicht werden. Im Bereich höherer Massenströme kann die effektive Diffusorquerschnittsfläche vergrößert werden, wohingegen bei kleinen Massenströmen und Annäherung an die Pumpgrenze die Diffusorquerschnittsfläche reduziert wird.

Die druckseitige Geometrie des Gebläses wird mittels Rapid-Prototyping basierend auf der numerischen Auslegung gefertigt, ein vollständiges Gebläse mit verstellbarer Rückwand aufgebaut und am Prüfstand gemessen. Darüber hinaus wird an mehreren Stellen innerhalb des Diffusors das Strömungsfeld bei verschiedenen Betriebspunkten mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) gemessen. Die gemessenen Strömungsbilder werden zur Analyse der prognostizierten Strömungsbeeinflussung und zur Validierung des numerischen Modells genutzt.

Sowohl in der numerischen Strömungssimulation als auch im Experiment zeigt das Gebläse mit der verstellbaren Diffusorrückwand das prognostizierte Verhalten: es kann mit abnehmendem Querschnitt eine Verbesserung des Wirkungsgrades im Teillastbereich erreicht und zudem bei höheren Massenströmen eine Wirkungsgradsteigerung erzielt werden, wenn der Querschnitt vergrößert wird.

Die PIV-Messungen des Strömungsfeldes im Diffusor bestätigen die Vorhersage der Simulation für den stabilen Betriebsbereich. Für den instationären Betriebsbereich in der Nähe der Pumpgrenze liefern die PIV-Ergebnisse wertvolle Hinweise auf die nabenseitige wandnahe Strömung im Diffusor, welche zur Ablösung neigt.

Einleitung

Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten und der geforderten und notwendigen Ressourcenschonung sind effiziente Energiewandler bei einer Vielzahl von technischen Anwendungen von herausragender und zunehmender Bedeutung. Ein Beispiel für einen effizienten Energiewandler ist die Brennstoffzelle, die je nach Bauart einen elektrischen Wirkungsgrad von über 60% erreichen kann. D.h. Brennstoffzellen können als Elemente der dezentralen Energieversorgung die in Zukunft bei der Kraft-Wärme-Kopplung erforderlichen hohen Stromkennzahlen liefern (höherer Strom- als Wärmebedarf, Niedrig-Energie- bzw. Null-Energie-Häuser). Um in einem Brennstoffzellensystem auch im Teillastbereich hohe Gesamtwirkungsgrade erreichen zu können, sind wirkungsgradoptimierte Subsysteme erforderlich. Der größte Energieverbraucher ist die Kathodenluftversorgung. Die Kathode des Brennstoffzellen-Stapels wird typischerweise mit einer konstanten Stöchiometrie gefahren. D.h. die Luftversorgung (oftmals über ein Gebläse) muss in Abhängigkeit vom Betriebspunkt variabel sein, da der Luftbedarf abhängig von der Stromdichte ist. Um über einen weiten Betriebsbereich des Brennstoffzellen-Systems eine hohe Effizienz zu erreichen und eine stabile Kathodenluft-Versorgung zu gewährleisten, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den Wirkungsgrad des Gebläses im Teillastbetrieb zu erhöhen und den stabilen Betriebsbereich des Gebläses zu erweitern.

Eine Möglichkeit dies zu erreichen, ist eine Betriebspunkt-abhängige Diffusor-Geometrie. Eine solche variable Geometrie wurde von Lohmann (2008) experimentell für einen unbeschaukelten und einen teilbeschaukelten Diffusor untersucht und der gewünschte Effekt nachgewiesen. Allerdings wurde in diesen Untersuchungen keine Volute verwendet; die Ausströmung am Diffusoraustritt erfolgte ins Freie. Der Effekt unterschiedlicher Diffusor-Querschnittsgeometrien auf das Kennfeld eines Radialverdichters wurde unter anderem von Jaatinen et al. (2010) untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Wirkungsgrad und Druckverhältnis im Teillastbereich des Verdichters erhöht werden können, wenn der Strömungsquerschnitt reduziert wird. Grundsätzlich kann das Kennfeld auch über andere Maßnahmen (z.B. variable Leitschaufeln im Diffusor oder variable Einlaufgeometrien) erweitert werden, allerdings stellt der hier angewendete Ansatz einer verstellbaren Diffusor- und Voluten-Rückwand einen einfachen Mechanismus dar, der im Kosten-dominierten Markt für Brennstoffzellensysteme einen größeren Erfolg verspricht. Dabei wird der von Lohmann (2008) verwendete Ansatz einer Diffusorverstellung mit dem Ansatz von Siva Reddy (2007) einer variablen Voluten-Geometrie kombiniert (Abb. 1). In einem ersten Schritt wird eine druckseitige Gebläse-Geometrie mit Hilfe von 1D-Verlustkorrelations-Modellen und numerischen Strömungssimulationen entwickelt, welche über Rapid-Prototyping in eine Realkonfiguration überführt wird. Es wird ein Gebläse mit verstellbarer Rückwand konstruiert und aufgebaut. Es wird ein Prüfstand aufgebaut, an dem das Kennfeld des Gebläses gemessen und die Strömung im Diffusor im Detail mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) untersucht wird.

Numerisches und experimentelles Set-up

In Abbildung 1 wird das Prinzip der Rückwandverstellung bei dem in diesem Projekt verwendeten Radialgebläse skizziert. Im Bereich des Diffusors wird eine flexible Membran verwendet, so dass sich das Flächenverhältnis des Diffusors variabel einstellen lässt. Die Querschnittsvariabilität der Volute wird über eine bewegliche Rückwand realisiert. Basis der Auslegung und Konstruktion sind ein E-Motor mit Laufrad aus dem Produktportfolio der Firma Vorwerk Elektrowerke GmbH. Die Strömungsgeometrie von Diffusor und Volute wird mittels einer Kombination aus 1D-Verlustkorrelations-Modellen und numerischen Simulationen ausgelegt. Details zu dem Auslegungsverfahren können Fischer et al. (2016) entnommen werden.

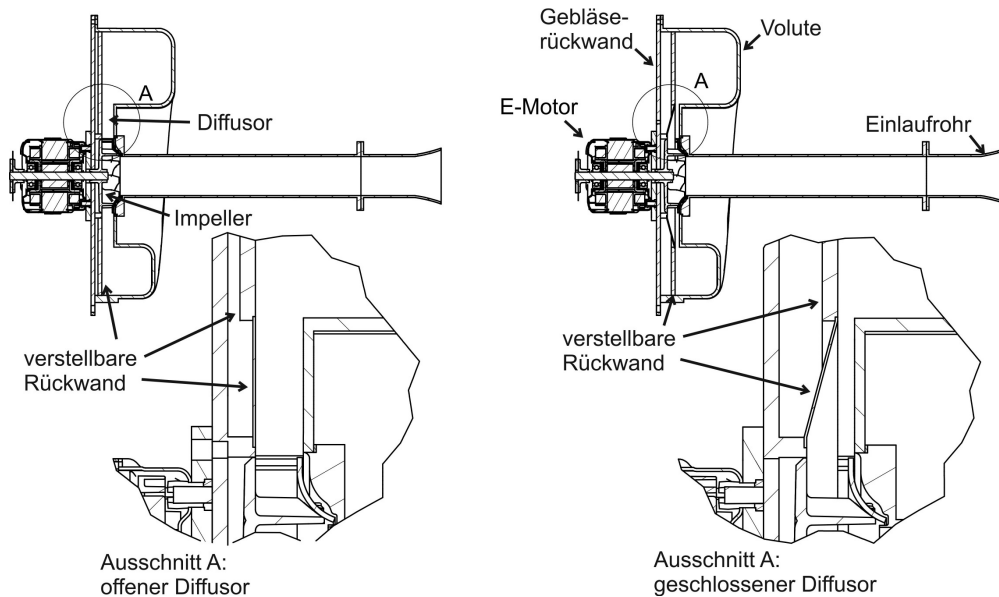


Abb. 1: Illustration des in diesem Projekt umgesetzten Konzepts der Querschnittsvariation von Diffusor und Volute: Schnittdarstellung des Gebläses mit Laufrad, Volute, Diffusor, E-Motor und Einlaufrohr mit verstellbarer Rückwand für offenen (links) und geschlossenen (rechts) Diffusor

Die numerischen Strömungssimulationen werden mit der Software ANSYS CFX durchgeführt. Das numerische Modell besteht aus 360°-Domänen aller Komponenten (Einlaufrohr, Laufrad, Diffusor und Volute) sowie zusätzlich einen Volumenkörper, der dem druckseitigen Volumen des Prüfstands entspricht (siehe Abbildung 2). Es werden strukturierte Netze für das Einlassrohr, das Laufrad und den Diffusor verwendet, während für die Volute ein unstrukturiertes Tetraeder-Netz genutzt wird. Als Randbedingungen am Eintritt wird die Totaltemperatur und der Totaldruck vorgegeben und am Austritt der Massenstrom. Zusätzlich wird die Drehzahl des Laufrades vorgegeben. Für den Übergangsbereich zwischen Laufrad und Diffusor wird dabei ein „frozen rotor“ Ansatz verwendet. Für die Turbulenzmodellierung wird das shear stress transport-Modell (SST) nach Menter (1994) genutzt. Die Details zu den einzelnen Rechengittern der unterschiedlichen Domänen werden in Abbildung 2 dargestellt.

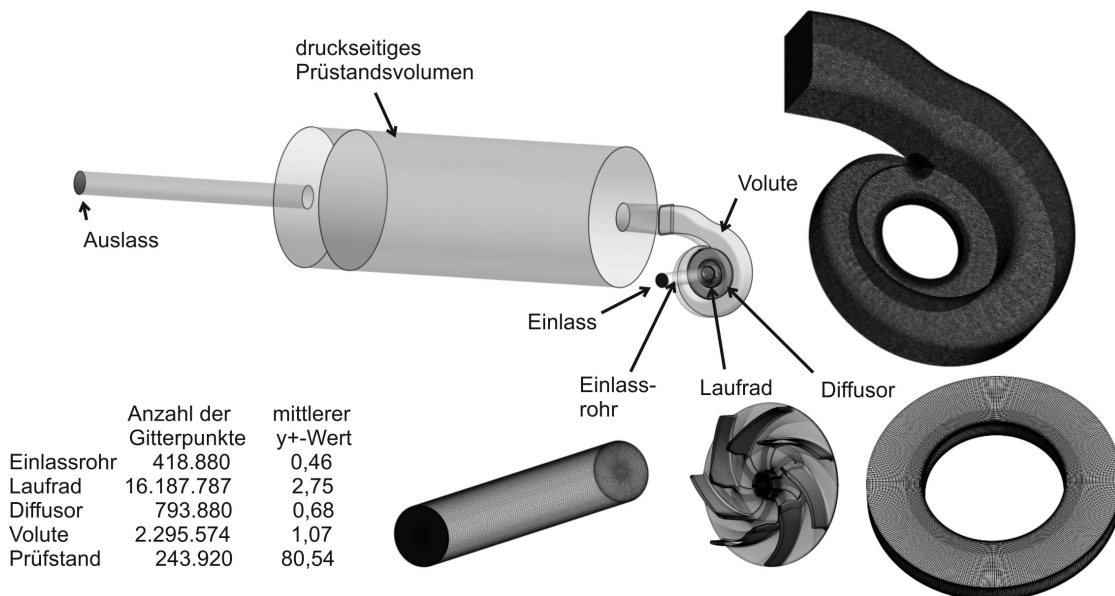


Abb. 2.: hochaufgelöstes numerisches Modell der Gebläsesimulation mit Darstellung der einzelnen Gitter von Einlassrohr, Laufrad, Diffusor und Volute

Die experimentelle Untersuchung des Gebläses wird auf dem Gebläse-Prüfstand des Zentrums für Brennstoffzellen Technik (ZBT) durchgeführt. Der Versuchsstand wird entsprechend der Normen DIN EN ISO 5801: 2011-11 (Industrieventilatoren-Leistungsmessung auf normten Prüfständen) und DIN EN ISO 5167-3:2003 (Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt) als druckseitiger Kammerprüfstand aufgebaut. Die Kammer wird ausgangsseitig mit einer Einlaufdüse nach DIN EN ISO 5167-3:2003 zur Bestimmung des Durchsatzes über die Druckdifferenz der Düse ausgestattet. Dazu wird zusätzlich über eine Temperaturmessung die Dichte bestimmt, so dass bei bekannter Düsengeometrie und dem entsprechenden Verlustbeiwert α der Volumenstrom berechnet werden kann. Der Verbraucher wird über eine ausgangsseitig montierte Drosselvorrichtung simuliert. Das Gebläse wird vor der Beruhigungskammer angebracht, um für die Strömungsmessungen im Gebläse mittels PIV ausreichend Raum zur Verfügung zu haben (Abbildung 3). Alle Messgrößen (Druckdifferenz gegenüber der Umgebung, Druckdifferenz über die Düse, Temperatur, Drehzahl und elektrische Leistung) werden mit einer Abtastrate von 1 Hz gemessen und die Daten über ein Mehrkanal-Analog-Messmodul verarbeitet. Die Datenaufbereitung und -speicherung erfolgt mittels Labview.

Für einfache Wartungs- und Säuberungszwecke wird das Gebläse als 3-teiliges modulares System aufgebaut, bestehend aus den Modulen Ansaugrohr, Voluten-/Diffusor-Gehäuse und Rückwand mit Verstellvorrichtung, sowie Laufrad und E-Motor. Das Gehäuse wird nach den Vorgaben der numerischen Vorauslegung und der numerischen Strömungssimulation mittels Laser-Sintern aus Polyamid hergestellt und anschließend schwarz lackiert, um störende optische Effekte bei der Beleuchtung für die PIV-Messungen zu minimieren. Zum Zweck der optischen Zugänglichkeit ist das Gehäuse an mehreren Stellen mit Öffnungen versehen, in die Glasfenster eingeklebt werden. Speziell im Bereich des Diffusors sind große Sichtfenster eingebaut (siehe Abbildung 3).

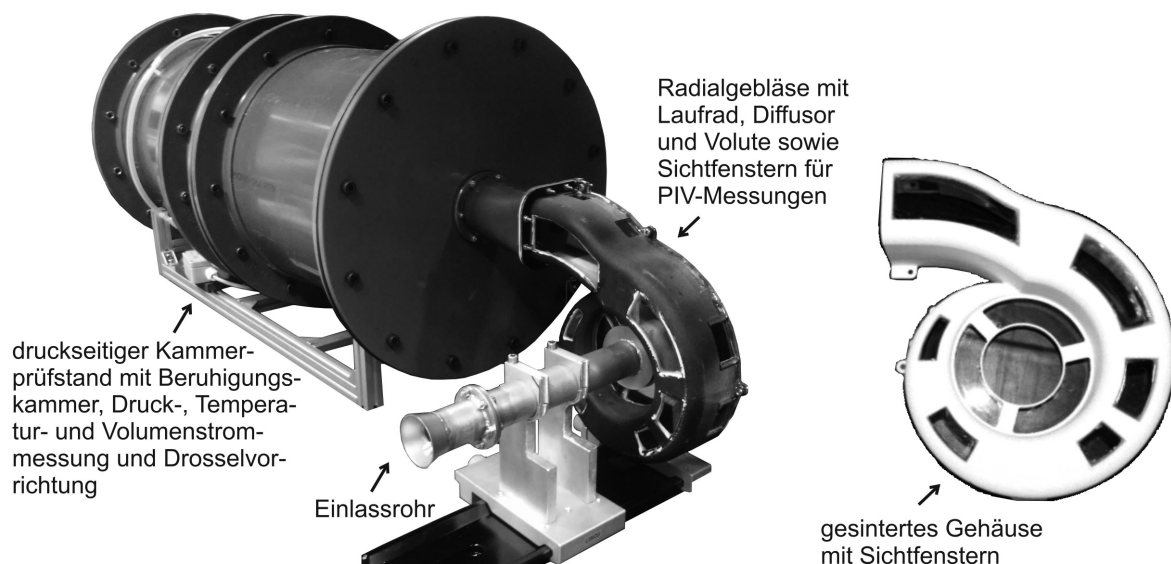


Abb. 3: druckseitiger Kammerprüfstand mit angeschlossenen Radialgebläse

CFD-Simulation der Gebläseleistung

Die Verbesserung der Gebläse-Leistung und der Wirkungsgrade im Teillast-Bereich durch eine variable Querschnittsfläche in Diffusor und Volute wird mit hochaufgelösten numerischen Strömungssimulationen untersucht. Für verschiedene Massenströme und Drehzahlen wird das Strömungsfeld berechnet und der Druckaufbau des Gebläses analysiert. Auf diese Weise können virtuelle Kennlinien ermittelt werden (siehe Abbildung 4).

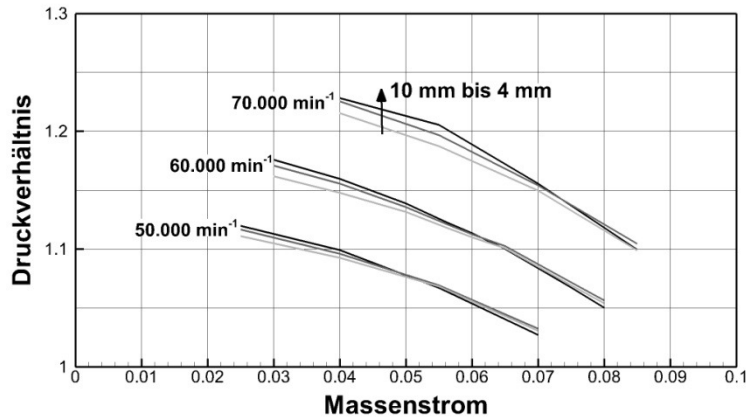


Abb. 4: Ergebnisse der Strömungssimulation für verschiedene Drehzahlen und unterschiedliche Diffusorstellungen

Der hier nachweisbare hauptsächlichste Effekt der Variation der Querschnittsfläche von Diffusor und Volute ist eine Änderung des maximalen Druckaufbaus für unterschiedliche Massenstrombereiche und eine Stabilisierung der Strömung bei kleineren Massenströmen. Wie in Abbildung 4 zu erkennen, führt eine Reduzierung des Querschnitts für die untersuchten Drehzahlbereiche zu einem Abkippen der Kennlinien, d.h. bei einer kleinen Diffusorbreite werden bei niedrigen Massenströmen höhere Drücke erreicht, wohingegen bei hohen Massenströmen ein breiterer Diffusor einen höheren Druckaufbau erzielt. Darüber hinaus stellt sich bei niedrigen Massenströmen und geringen Diffusorbreiten eine Stabilisierung der Strömung ein, was sich bei den stationären numerischen Simulationen darin äußert, dass sich in diesem Bereich die numerische Konvergenz der Simulation verbessert.

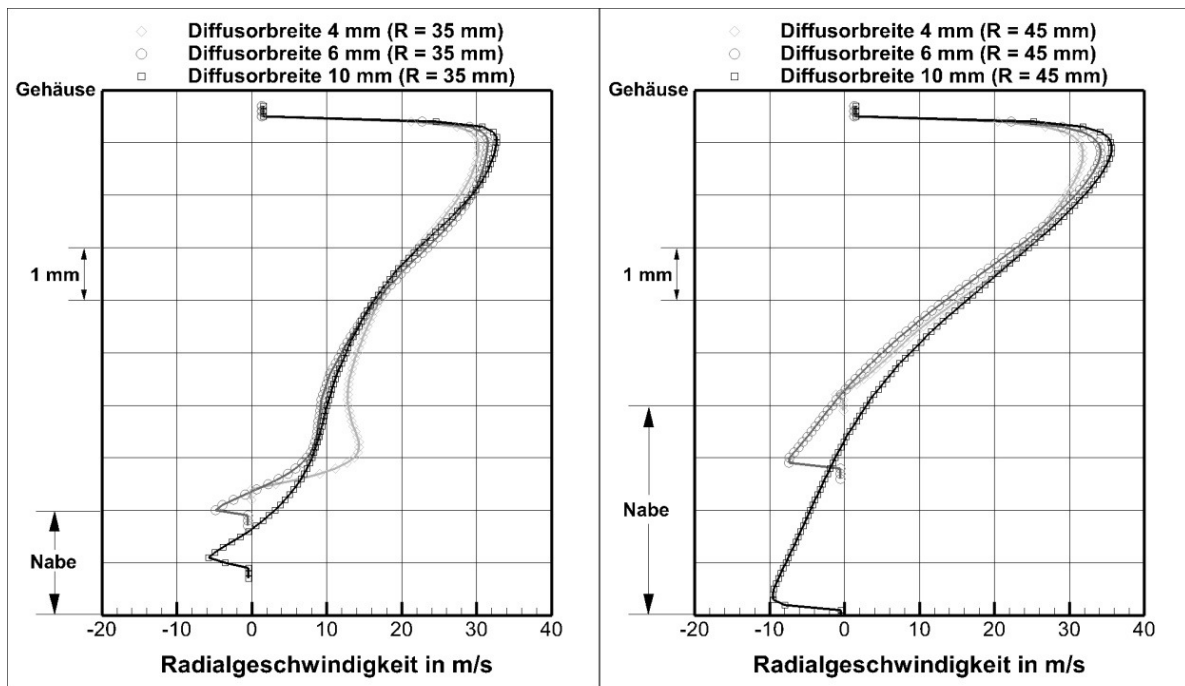


Abb. 5: Effekt der Diffusorquerschnittsverjüngung auf die Strömung im Diffusorspalt (oben links und rechts) und Skizze zur Orientierung (links)

Eine Änderung des Druckaufbaus resultiert aus einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten bzw. des Strömungsfeldes. Im Folgenden wird dieser Effekt über die Darstellung der Umfangsgemittelten Radialgeschwindigkeiten im Diffusor erläutert. Abbildungen 5 zeigt die berechneten Verteilungen der Radialgeschwindigkeit für drei verschiedene Diffusorbreiten (4...10 mm) für einen Betriebspunkt maximalen Wirkungsgrades. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausprägung des nabenseitigen Rückströmgebietes mit zunehmendem Radius ansteigt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verringerung der Diffusorbreite die Diffusorströmung stabilisiert und die nabenseitige Ablösung verhindert. Dies resultiert aus dem durch das geringere Flächenverhältnis reduzierten Druckgradienten in Strömungsrichtung.

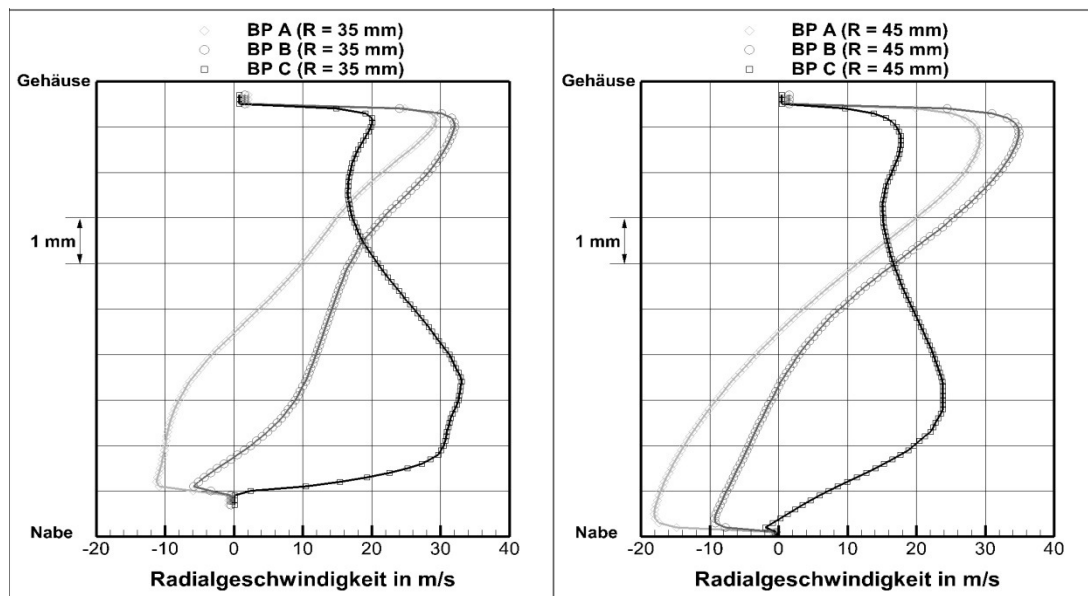


Abb. 6: Veränderungen des Strömungsfeldes im Diffusor für unterschiedliche Betriebspunkte

Abbildung 6 zeigt die umfangsgemittelten Radialgeschwindigkeiten für drei verschiedene Betriebspunkte (BP A - C) bei einer Diffusorbreite von 10 mm an zwei unterschiedlichen radialen Positionen (35 und 45 mm). Bei einem geringen Massenstrom (BP A), d.h. nahe der Pumpgrenze ist die Rückströmung im Nabenseitigen Bereich des Diffusors deutlich zu erkennen. Das Rückströmgebiet wächst mit zunehmender Lauflänge an. Im Auslegungspunkt (BP B) ist für eine Diffusorstellung von 10 mm noch eine Rückströmzone zu erkennen, die sich gegenüber BP A allerdings verkleinert hat. Bei einem Betriebspunkt nahe des maximalen Massenstroms (BP C) tritt keine Rückströmung mehr auf.

Ermittlung des Gebläsekennfeldes am Prüfstand

Für die experimentelle Untersuchung des zusammengebauten Gebläses werden die Drehzahl und die Drosselstellung variiert, so dass für verschiedene Diffusorstellungen Kennfelder ermittelt werden können. Exemplarisch sind in Abbildung 7 die gemessenen Kennfelder für eine Diffusorstellung von 10 mm und 4 mm dargestellt. Die Kennfeldgrenzen sind zum einen eine Steuerungsbedingte minimale und maximale Leistungsaufnahme des Elektromotors (obere und untere Grenze der Kennfelder in Abbildung 7) sowie die Betriebsgrenzen des maximalen Durchflusses (rechte Begrenzung) und die Pumpgrenze (linke Grenze) gesetzt. Insgesamt zeigt sich das typische Verhalten eines Radialgebläses: ein Androsseln erhöht die Druckdifferenz gegenüber der Umgebung und verringert den Durchfluss. Eine Drehzahlerhöhung erhöht den Druck und den Durchfluss. Der Punkt maximalen Wirkungsgrades wird bei moderater Drosselung und mittleren Drehzahlen erreicht. In Abbildung 7 ist zusätzlich die Kennlinie maximalen Wirkungsgrades aus den numerischen Simulationen eingezeichnet. Es zeigt sich eine Differenz zu den Messergebnissen. Insgesamt werden die erreichbaren Drü-

cke bei vorgegebenen Massenströmen überschätzt. Der Grund hierfür ist zum einen in dem Ansatz des „frozen rotor“ Modells zu suchen, das die Mischungsverluste beim Übergang von Laufrad zu Diffusor unterschätzt, zum anderen ist der Eintrittsdruck bei der Messung eine Funktion des Massenstroms, d.h. im Gegensatz zum numerischen Modell nicht konstant.

Eine Detailanalyse der gemessenen Kennfelder zeigt, dass sich das gewünschte und vorhergesagte Verhalten des Gebläses bei einer Verstellung der Diffusorbreite einstellt. Wie schon in der numerischen Strömungssimulation vorhergesagt (vgl. Abb. 4) bewirkt eine Verringerung der Diffusorbreite einen Anstieg des erreichbaren Druckaufbaus bei niedrigeren Massenströmen. Umgekehrt ist das Verhalten bei hohen Massenströmen. Anschaulich zeigt sich dieses Verhalten in einem Verkippen des Kennfeldes bei Verringerung der Diffusorbreite (siehe Abb. 7, rechts). Darüber hinaus zeigt sich eine Verschiebung der Wirkungsgrad-Niveaus. Insgesamt erhöht sich der maximale Wirkungsgrad um 1 Prozentpunkt bei Verringerung der Diffusorbreite. Gleichzeitig wird der Bereich höherer Wirkungsgrade (in Abbildung 7 markiert als Berandung der Gebiete $\eta \geq 40\%$ und $\eta \geq 35\%$) zu kleineren Massenströmen und höheren Drücken verschoben. Insgesamt lässt sich feststellen, dass in diesem Bereich Wirkungsgradsteigerungen von bis zu 3 Prozentpunkten erzielt werden können.

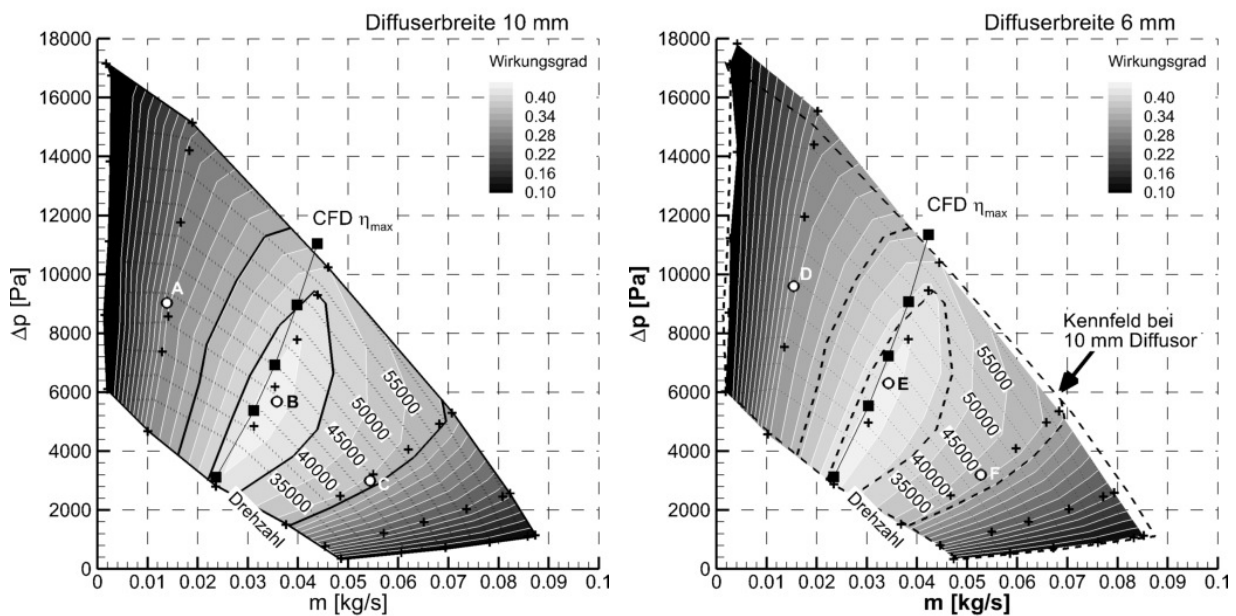


Abb. 7: Effekt der Diffusorquerschnittsverjüngung auf das Kennfeld des Gebläses; links: Kennfeld bei Diffusorbreite 10 mm, rechts: Kennfeld bei Diffusorbreite 6 mm

PIV-Messungen am Gebläse

Die Veränderungen des Druck-Massenstrom-Kennfeldes sind auf Veränderungen der Strömungsverhältnisse innerhalb des Gebläses zurückzuführen, insbesondere auf die Durchströmung des Diffusors und die resultierenden Abströmwinkel. Diese Effekte werden mit Hilfe der Particle-Image Velocimetry (PIV) untersucht. Details zu dieser Technik können Yarin et al. (2007) entnommen werden.

In diesem Fall besteht der PIV-Aufbau (siehe Abbildung 8) aus einem Litron Nano L Laser mit 2 Kavitäten und 135 mJ Pulsenergy bei 15 Hz sowie einer 12 bit PCO Sencam QE Kamera mit 1376 x 1040 Pixeln. Das Laserlicht wird über einen Lichtarm geführt und am Austritt aus dem Lichtarm über einer Zylinderlinsen-Optik zu einem Lichtschnitt geformt. Der Lichtschnitt hat dabei eine Dicke von unter 1 mm. Da das Gebläse sowohl an der Frontseite, als auch an den Seiten der Volute mit Fenstern versehen ist (vgl. Abb. 3) kann der Lichtschnitt

seitlich in das Gebläse geführt werden und in diesem Falle ein Segment des Diffusors ausleuchten. Die für die PIV-Technik erforderlichen Tracerpartikel werden mittels eines Laskin-Seeders generiert, in dem ein Aerosol aus DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) erzeugt wird. Die Partikel haben einen mittleren Durchmesser von $1\ \mu\text{m}$. Da im Gebläse sehr hohe Radialgeschwindigkeiten auftreten und im Aerosol auch größere Tropfen auftreten oder im Gebläse durch Agglomeration entstehen können, welche der Strömung nicht mehr folgen können, kann es zu DEHS-Ablagerungen an den Gehäusewänden und Fenstern kommen. Um eine Tropfenablagerung oder Filmbildung zu verhindern, werden die Sichtfenster mit einer oleophoben Nanobeschichtung versehen. Darüber hinaus werden das Gehäuse und das Laufrad schwarz lackiert, um das Hintergrundrauschen der Aufnahmen bei der Laserlicht-Beleuchtung zu minimieren. Außerdem wird die verstellbare Diffusor- und Volutenrückwand mit einem wässrigen Anstrich mit gelöstem Rhodamin-B versehen. Rhodamin-B wird durch die verwendete Wellenlänge von $532\ \text{nm}$ zur Fluoreszenz angeregt, was zu einer Spektralverschiebung in den orangenen Bereich führt. Durch die Verwendung eines Farbfilters vor der Kamera kann so das Streulicht an der Rückwand, welches durch diffuse Reflektionen an Partikeln, Fenstern und Gehäusewänden entsteht, von dem grünen Streulicht der Partikel separiert werden. Auf diese Weise kann die Qualität der Partikelbilder, d.h. das Kontrastverhältnis und das Rauschen verbessert werden. Die Partikelbilder werden mit der Software DaVis von LaVision aufgenommen und verarbeitet. Eine Bildnachbearbeitung ist trotz aller Maßnahmen erforderlich, um das Hintergrundrauschen zu eliminieren. Bei jedem mittels PIV untersuchten Betriebspunkt des Gebläses werden 400 Doppelbilder aufgenommen, was eine effektive Bildanzahl von 400 Vektorbildern bei einer Bildrate von $5\ \text{Hz}$ ergibt.

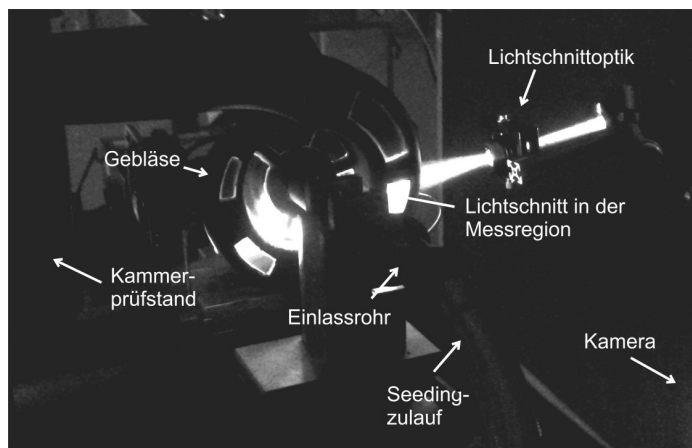


Abb. 8: Durchführung einer PIV-Messung am Gebläse

Exemplarisch werden für zwei verschiedene Diffusorstellungen die typischen Strömungsfelder im Diffusor im Bereich unterhalb der Volutenzunge gezeigt (Abb. 9). Gemessen wird dabei auf halber Diffusorbreite, zwischen Nabe und Gehäuse. Es wird das Drehzahlniveau für den maximalen Wirkungsgrad gehalten und die Drosselung variiert, so dass sich je 3 verschiedene Betriebspunkte ergeben. Man erkennt deutlich die Veränderung der Strömungswinkel bei Variation des Gegendrucks. Für Betriebspunkte in der Nähe der Pumpgrenze (Fall A und D) sind die Winkel der Stromlinien gegenüber der Radialrichtung deutlich stumpfer als für Betriebspunkte in der Nähe des maximalen Massenstroms (Fälle C und F). Für letztere Fälle erkennt man ein deutliches Aufsteilen der Diffusorströmung, d.h. spitze Winkel in Bezug zur Radialrichtung. Somit liegt am Laufradaustritt nur eine geringe Umfangskomponente der absoluten Strömungsgeschwindigkeit vor. In der Konsequenz bedeutet dies, dass dem Fluid im Laufrad nur wenig kinetische Energie zugeführt wird. Zwar treten bei der Diffusorbreite von $10\ \text{mm}$, infolge des in diesem Fall optimalen Querschnitts geringere Strömungsverluste auf, jedoch findet aufgrund des niedrigen kinetischen Energieanteils auch nur ein geringer Druckaufbau statt. Grundsätzlich anders verhält es sich für die Fälle nahe der

Pumpgrenze (A und D). Hier sind eine hohe Umfangskomponente der absoluten Strömungsgeschwindigkeit und damit ein hoher kinetischer Energieanteil vorhanden. Der für den geringen Massenstrom zu große Diffusorquerschnitt von 10 mm führt dazu, dass die Strömung der Kanalkontur nicht folgen kann und an den Wänden ablöst. Dadurch treten zusätzlich zu den, aufgrund des längeren Strömungsweges erhöhten Wandreibungsverlusten, Reibungsverluste an der Scherschicht zwischen Ablösegebiet und Kernströmung auf, was im Vergleich zu der kleineren Diffusorbreite von 6 mm eine weitere Verschlechterung des aerodynamischen Wirkungsgrades zur Folge hat. Bei weiterer Drosselung werden die Strömungswinkel zu groß ($\geq 90^\circ$): das Fluid wird im Diffusor nur noch im Kreis gefördert, es kommt zu einer Strömungsumkehr und zu den für Pumpzyklen charakteristischen Druckpulsationen.

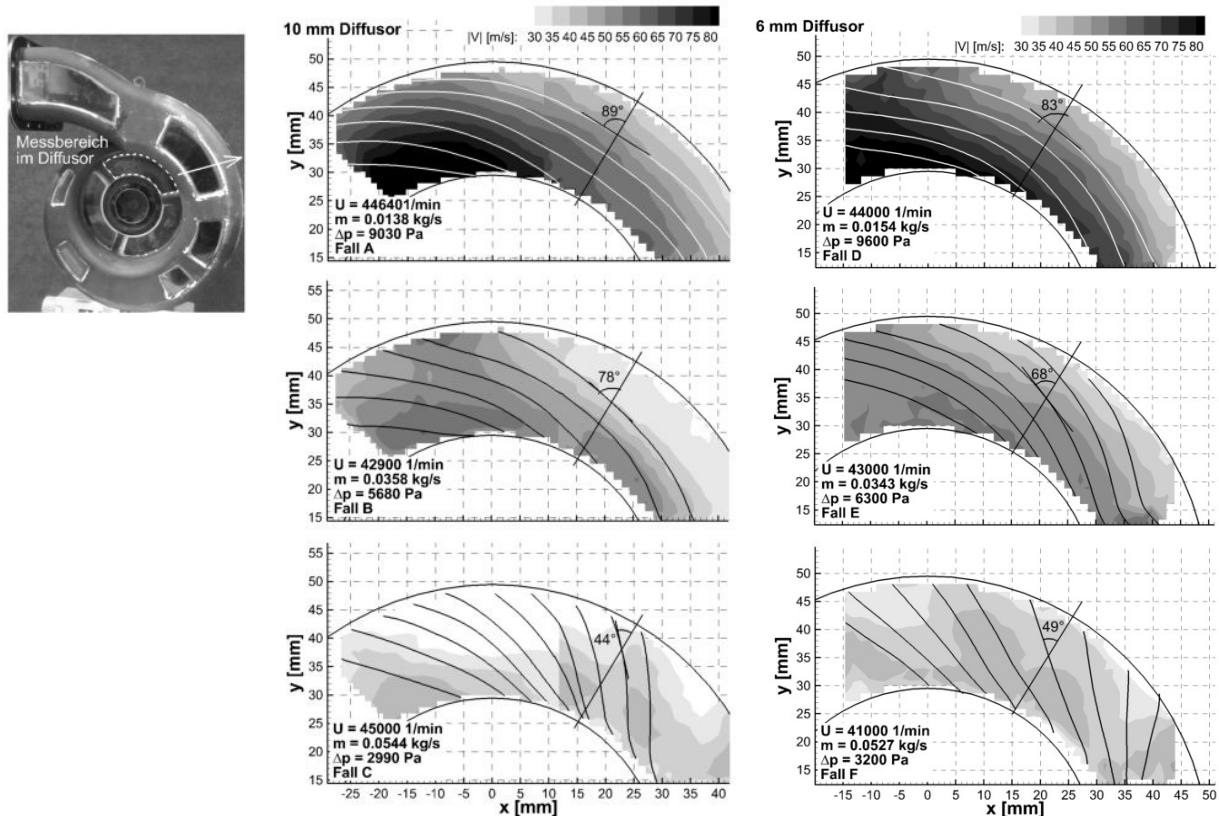


Abb. 9: Darstellung der typischen Geschwindigkeitsfelder im Diffusor für eine Diffusorstellung von 10 mm und konstantem Drehzahlbereich (links) und für eine Diffusorstellung von 6 mm und konstantem Drehzahlbereich (rechts)

Bei Betrachtung von Abbildung 9 fällt auf, dass die Strömungsverteilungen bei beiden Diffusorstellungen für Betriebspunkte nahe der Pumpgrenze (Fall A und D) deutlich höhere Absolutgeschwindigkeiten aufweisen als für Betriebspunkte nahe dem maximalen Massenstrom (Fall C und F), obwohl in den ersteren Fällen deutlich geringere Massenströme durch das Gebläse transportiert werden. Die hier dargestellte Verteilung der Absolutgeschwindigkeit im Bereich der Mittelebene liefert somit einen Hinweis auf eine ausgeprägte Dreidimensionalität der Strömung.

Um diese Annahme zu verifizieren wird mit Hilfe der PIV-Messtechnik im Folgenden die Strömung im Diffusor für eine Diffusorbreite von 10 mm für verschiedene Messebenen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 zusammengefasst. Dargestellt sind die Strömungsverteilungen und Stromlinien für jeweils 3 Messebenen: etwa 0.5 mm von der Nabewand entfernt (h1), in der Mitte des Diffusors (h5) sowie an der Gehäusewand (h9). Für den Fall A sind die Einzelebene separat dargestellt sowie eine Überlagerung dieser Ebenen mit

ihren Stromlinien (oben rechts). Für die Fälle B (rechts Mitte) und C (rechts unten) werden nur die überlagerten Darstellungen gezeigt.

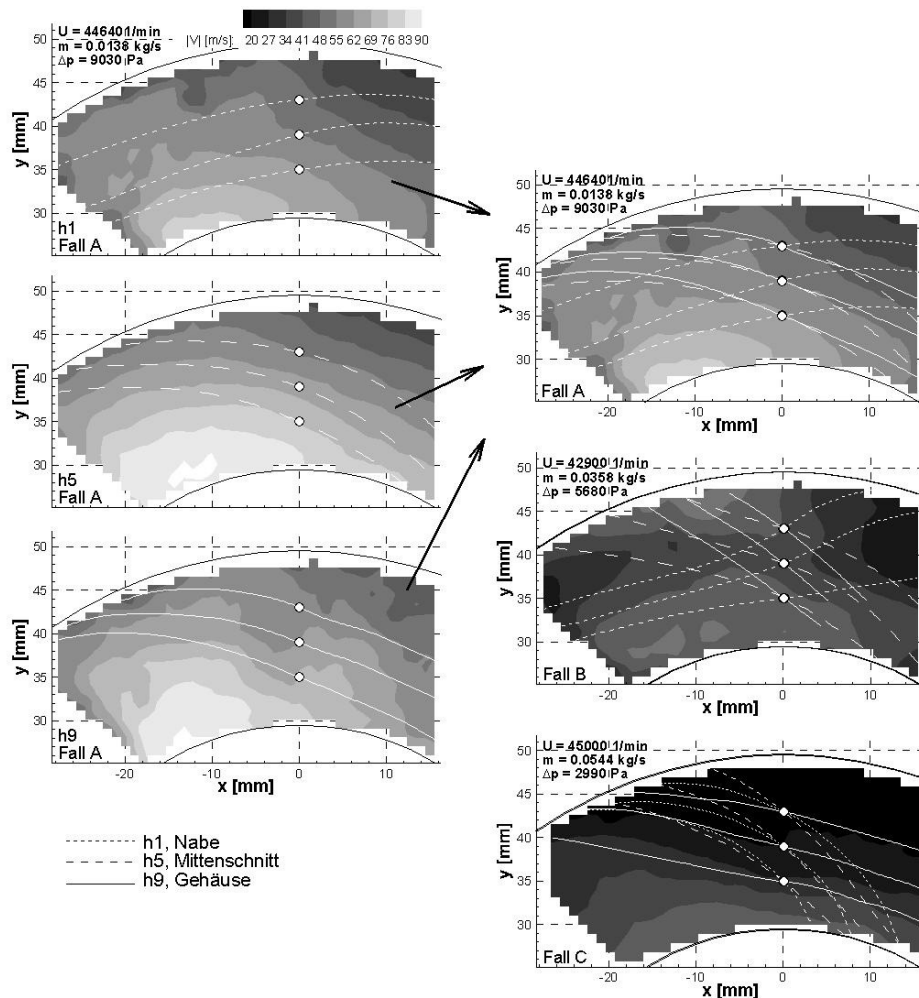


Abb. 10: Darstellung der typischen Geschwindigkeitsfelder im Diffusor an der nabenseitigen Diffusorwand (- - -), in der Diffusormitte (— —) und an der Gehäusewand (——) für eine Diffusorstellung von 10 mm für verschiedene Betriebspunkte

Deutlich zu erkennen ist die Verlagerung der Strömungsrichtung von der Nabenseite zur Gehäuseseite. Am ausgeprägtesten ist dies für die Fälle A und B zu sehen: hier sind nabenseitig deutlich Rückströmungen zu beobachten, wie sie auch in der Strömungssimulation bereits zu erkennen sind (Abb. 5 und 6). Diese Rückströmung hat eine Verdrängungswirkung zur Folge, wodurch sich der effektive Strömungsquerschnitt reduziert, was sich in höheren Geschwindigkeitsniveaus in der Diffusormitte und am Gehäuse äußert (Abbildung 9 und 10, links). Im Falle des Betriebs nahe des Wirkungsgradmaximums (Fall B) ist ebenfalls eine Rückströmung zu erkennen. Im Bereich des Messgebiets direkt unter der Volutenzunge erkennt man jedoch eine starke Ablenkung der Stromlinien, die auf den Zungeneinfluss zurückzuführen sind. Insgesamt ist die Strömung deutlich homogener als für Fall A. Für Betriebspunkte im Bereich des maximalen Massenstroms (C) tritt keine Rückströmung auf, wodurch das Geschwindigkeitsniveau im Diffusor insgesamt sinkt (vgl. Abb. 9). Die Messergebnisse für den Fall einer Diffusorbreite von 10 mm bestätigen die Ergebnisse der Simulation. Bei einer Diffusorstellung von 6 mm ist nach der Simulation die Rückströmzone bereits deutlich reduziert, in den Messungen ist das Geschwindigkeitsfeld signifikant homogener als bei 10 mm. Dies bestätigt die Ergebnisse der Simulation, dass in diesem Fall keine Rückströmung auftritt, welche eine Verdrängungswirkung ausüben könnte.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wird ein über einen weiten Betriebsbereich effizientes Kathodenluft-Gebläse mit variablem Diffusor- und Volutenquerschnitt für ein Brennstoffzellensystem entwickelt. Die druckseitige Gebläse-Geometrie wird mittels 1D-Verlustkorrelations-Modellen und numerischen Strömungssimulationen entwickelt. Anschließend wird diese Geometrie über Rapid-Prototyping in eine Realkonfiguration überführt und am Prüfstand vermessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die in der Simulation vorhergesagte Verbesserung des Betriebsverhaltens insbesondere im Teillastbereich erreicht wird. Im Bereich höherer Massenströme kann der Wirkungsgrad erhöht werden, indem die effektive Diffusorquerschnittsfläche vergrößert wird, wohingegen bei kleinen Massenströmen und Annäherung an die Pumpgrenze ein stabileres Betriebsverhalten und eine größere Effizienz durch eine reduzierte Diffusorquerschnittsfläche erreicht wird. Detailuntersuchungen des Strömungsfeldes im Diffusor mittels Simulation und Particle-Image Velocimetry (PIV) zeigen, dass sich bei größeren Diffusorbreiten und geringen Massenströmen ein nabenseitiges Rückströmgebiet ausbildet. Die Messungen bestätigen das Ergebnis der numerischen Simulationen, dass die Verringerung der Diffusorbreite die Diffusorströmung stabilisiert und die nabenseitige Ablösung verhindert. Für eine weitere Effizienzsteigerung des Gebläses ist eine teilbeschaufelung des Diffusors zusätzlich zur Betriebspunkt-abhängigen Rückwandverstellung vorgesehen. Auf diese Weise kann der Betriebsbereich in der Nähe der Pumpgrenze beeinflusst werden, bei der die nabenseitige wandnahe Strömung im Diffusor zur Ablösung neigt. Hier liefern die PIV-Ergebnisse Details zur Strömung im Diffusor hinsichtlich der Ausprägung der Ablösezone, um so geeignete Schaufelgeometrien festlegen zu können.

Dankesworte

Das Forschungsvorhaben IGF 18100N „Entwicklung eines Kleingebläses mit veränderlichem Diffusor und angepasster, veränderlicher Spirale für Brennstoffzellensysteme“ (Laufzeit 01.03.2014 - 30.09.2016) wird im Programm zur Förderung der "Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)" vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die AiF finanziert. Dank gilt M. Meggle und G. Hackert von Vorwerk Elektrowerke GmbH, den Mitgliedern des Industriearbeitskreises des IGF-Projektes „Kleingebläse für Brennstoffzellen“, dem Regionalen Rechenzentrum für Niedersachsen (RRZN) sowie Herrn A. Roos für die Unterstützung bei dem Projekt.

Literatur

Fischer, T., Rudersdorf, M., Burgmann, S., kleine Sextro, T., Seume, J. R., (2016): „Investigation of a volute diffuser combination with variable cross sectional area for centrifugal fans“, Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Conference and Exposition, GT2016, June 13 - 17, 2016, Seoul, South Korea

Jaatinen, A., Grönmann, A., Turunen-Saaresti, T., Röyttä, P., (2010): “Effect of vaneless diffuser width on the overall performance of a centrifugal compressor”, Proc. IMechE, Vol. 000, Part A, J. Power and Energy, DOI 11.117/0957650911399828

Lohmann, U., (2008): “Entwicklung und Untersuchung eines breitenveränderlichen, teilbeschaufelten Diffusors für ein radiales Kleingebläse”, Ph.D. thesis, Universität Duisburg-Essen, ISBN 978-3-86727-490-6

Siva Reddy, T.Ch., Ramana Murty, G.V., Prasad, M.V.S.S.S.M., Reddy, D.N., (2007): “Proc. IMechE, Vol. 221, Part A, J. Power and Energy, DOI 10.1243/09576509JPE373

Yarin, A., Tropea, C., Foss, J.F. (2007):” Handbook of Experimental Fluid Mechanics”, Springer, Berlin-Heidelberg.