Doppler Global Velocimetry Messungen im Verteilerkanal eines typischen Abblase-Luftsystems für mehrstufige Axialverdichter

Carsten Schwarz, Holger Brandt
Leonhard Fottner†
Institut für Strahlantriebe
Universität der Bundeswehr München
Werner Heissenberg Weg 39
D-85577 Neubiberg

Guido Stockhausen, Manfred Beversdorff
Richard Schodl
Institut für Antriebstechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Linder Höhe
D-51147 Köln

Abstract

Am Institut für Strahlantriebe wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Untersuchung der stark dreidimensionalen Strömungsverhältnisse im Verteilerkanal eines für mehrstufige Axialverdichter typischen Abblase-Luftsystems das am Institut für Antriebstechnik des DLR in Köln entwickeltes Doppler Global Velocimetry Verfahren eingesetzt. Das DGV - Verfahren beruht auf einer direkten Messung der durch den Doppler–Effekt hervorgerufenen Frequenzverschiebung des von mit der Strömung bewegenden Partikeln gestreuten Laserlichts beruht. Es ist in der Lage, alle drei räumlichen Geschwindigkeitskomponenten zeitlich gemittelt und flächenhaft zu erfassen. In dieser Veröffentlichung werden Versuchsaufbau und Messtechnik beschrieben und ausgewählte Ergebnisse der Messungen vorgestellt, die ein komplexes dreidimensionales Strömungsbild zeugen, das sich örtlich unterscheidet und von der Abblaserate abhängig ist.

Einführung

Zur Versorgung der Sekundärluftsysteme von Turbostrahltriebwerken, wie z.B. Turbinenkühlluftversorgung oder externer Verbraucher (Klimaanlage) wird Zapfluft, abhängig vom jeweiligen Druckbedarf aus den mittleren und hinteren Stufen der mehrstufigen Axialverdichter entnommen(Abb. 1). Ein übliches Verfahren hierzu ist es, die Luft über einen umlaufenden Schlitz im Verdichtergehäuse in einen ringförmigen Verteilerkanal zu leiten. Von dort wird die Sekundärluft über entsprechende Entnahmeleitungen weiter zu den Verbrauchern geleitet. Bei der aerodynamischen Auslegung der Sekundärluftsysteme ist darauf zu achten, daß den angeschlossenen Verbrauchern in jedem Betriebspunkt die ausreichende Menge

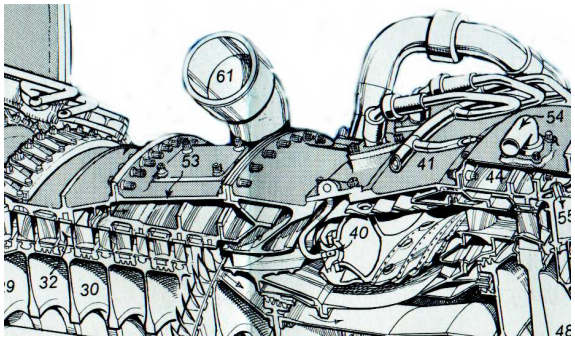

Abbildung 1: Abblase–Luftsystem des CFM56

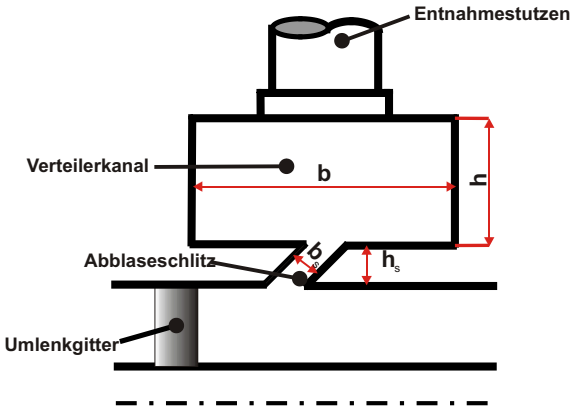

Abbildung 2: Modell des Abblase–Luftsystems

Luft mit einem bestimmten Druck zur Verfügung gestellt wird. Meist werden empirische Korrelationen zur Auslegung der einzelnen Komponenten des Abblase–Luftsystems herangezogen [1, 3], die an einfachen, vorwiegend zweidimensionalen Modellen gewonnen wurden [2, 4].
Am Institut für Strahlantriebe wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens an einem für mehrstufige Axialverdichter typischen dreidimensionalen Abblase-Luftsystem aerodynamische Messungen durchgeführt. Die daraus gewonnenen Daten sollen zur Weiterentwicklung der existierenden Korrelationen dienen. Von besonderem Interesse war bei den Untersuchungen die Geschwindigkeitsverteilung und Strömungstopologie im Verteilerkanal. Da sich real ausgeführte Abblase-Luftsysteme in ihrer geometrischen Ausführung stark unterscheiden und sich außerdem aufgrund der kleinen Abmessungen für aerodynamische Messungen schlecht eignen, wurde zunächst ein vereinfachtes und unter Einhaltung von Mach- und Reynoldszahl vergrössertes, dreidimensionales Modell eines Abblase-Luftsystems entwickelt (Abb. 2). Basierend auf diesem Modell wurde eine Messstrecke konstruiert und gefertigt, die in den geschlossenen Windkanal des Instituts für Strahlantriebe integriert werden konnte. Die Messstrecke ermöglicht dabei auch Variationen der Geometrie des Abblase-Luftsystems.
Die hier vorgestellten Windkanal - Untersuchungen dienten der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Visualisierung der Strömungstopologie im Verteilerkanal. Zur Messung wurde ein vom Institut für Antriebstechnik des DLR in Köln entwickeltes Doppler Global Velocimetry Lasermessverfahren eingesetzt. Diese Messtechnik ist in der Lage, alle drei räumlichen Geschwindigkeitskomponenten zeitlich gemittelt und flächenhaft zu erfassen.

Versuchsaufbau und Messtechnik

Aufbau des geschlossenen Modellwindkanal und der Messstrecke

Ein Schema des geschlossenen Modellwindkanals mit eingebauter Messstrecke ist in Abbildung 3 dargestellt. Konstruktion und Aufbau des Windkanals mit Messstrecke (Abb. 4) sowie die dazugehörige

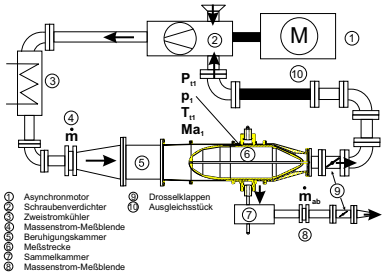

Abbildung 3: Schema des geschlossenen Windkanals

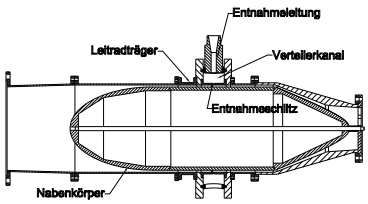

Abbildung 4: Konstruktion der Messstrecke

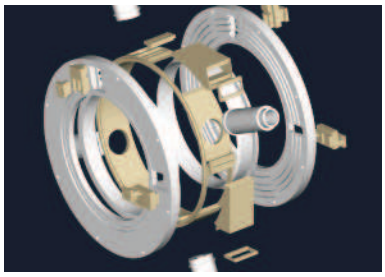

Abbildung 5: Konstruktion der optischen Zugänge

pneumatische Messwerterfassung werden ausführlich in [5] beschrieben. Für die Messungen mit dem DGV System mussten zusätzlich insgesamt vier optische Zugänge für den Verteilerkanal konstruiert werden (Abb. 5). In die beiden Verteilerkanalseitenwände sowie in die Verteilerkanaldecke wurden in einer Ebene je ein schmales Lichtschnittfenster eingesetzt. Zur Vermeidung von gegenseitigen Reflexionen und Spiegelungen wurden die Fenster in die Verteilerkanalseitenwände mit einem Winkel von 5° zur Wand eingebaut. Der vierte optische Zugang dient als Beobachtungsfenster, um die Messebene mit einer CCD Kamera erfassen zu können. Dazu wurde parallel zur Lichtschnittebene mit Hilfe eines Erkeraufsatzes ein weiteres Fenster in die ringförmige Verteilerkanaldecke eingesetzt. Der Erkeraufsatz wurde mit einer zusätzlichen Glasscheibe gegen den Verteilerkanal abgedichtet.

Doppler Global Velocimetry Verfahren

Das Anfang der neunziger Jahre entwickelte DGV-Verfahren [6],[7] misst, wie auch LDA oder PIV, die Geschwindigkeit von Tracer-Partikeln, die der Strömung zugegeben werden müssen. Für die zeitlich gemittelte Messung von drei räumlichen Geschwindigkeitskomponenten in einer Messebene wird diese mit dem Licht von einem frequenzstabilisierten cw-Ar-Ionenlaser aus drei verschiedenen Richtungen nacheinander beleuchtet. Das beim Durchfliegen der Messebene durch die Tracer–Partikel entstehende Streulicht wird mit einem speziellen Kamerasystem unter einer festen Beobachtungsrichtung erfasst und ausgewertet (Abb. 6). Das Messverfahren beruht auf der Tatsache, daß die Frequenz des an den bewegten Partikeln gestreuten Lichts aufgrund des Dopplereffektes frequenzverschoben ist:

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 \tag{1}$$

ν_0 = Laserfrequenz , ν = Frequenz des Streulichtes, $\Delta\nu$ = Dopplerverschiebung

Die Frequenzverschiebung hängt hierbei von der Partikelgeschwindigkeit v, der Lichtschnittrichtung $\vec{l}$ sowie der Beobachtungsrichtung $\vec{o}$ ab:

$$\Delta\nu = \nu_0/c(\vec{o} - \vec{l})v \tag{2}$$

Die grundlegende Idee von DGV beruht auf der direkten Messung der doppler-verschobenen Licht-

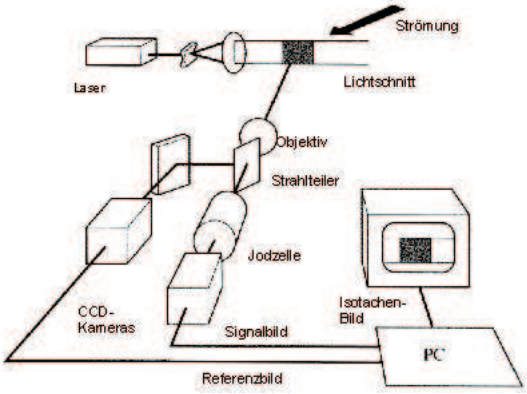

Abbildung 6: DGV-Geschwindigkeitsmessung

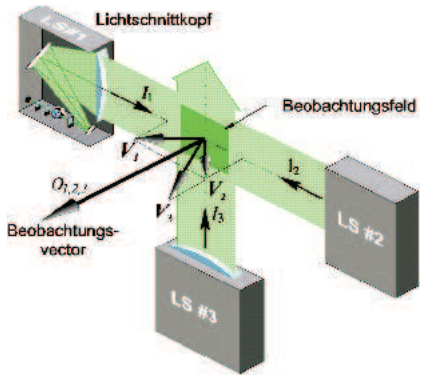

Abbildung 7: Anordnung der Lichtschnitte

frequenz mithilfe einer jodgefüllten Absorptionszelle. Dabei werden die starken Absorptionsbanden des Jodmoleküls als Frequenz-Intensitätskonverter genutzt. Dazu werden bei diesem DGV-System zwei CCD-Kameras als Detektoren benutzt, die beide denselben Ausschnitt der Messebene sowohl mit als auch ohne Absorptionszelle beobachten. Durch pixelweise Division der beiden resultierenden Bilder und weiterer Nachbearbeitung lassen sich erst die Dopplerverschiebung und daraus anschließend eine zeitlich gemittelte Geschwindigkeitskomponente im Lichtschnitt bestimmen. Die zweite und dritte Komponente der Teilchengeschwindigkeit erhält man durch einen Wechsel der Lichtschnittrichtung.
Das am DLR-Institut für Antriebstechnik in Köln entwickelte DGV-System ist für die Bestimmung von zeitlich gemittelten, drei-komponentigen Geschwindigkeitsdaten in einer Ebene optimiert worden und ist im wesentlichen aus drei Komponenten aufgebaut: (a) ein frequenz-stabilisierter CW-Laser, (b) drei Lichtschnittgeneratoren und (c) ein DGV-Bild-Aufnahmesystem (Kamerasystem). Das stabilisierte Lasersystem besteht aus einem modifizierten Ar-Ionenlaser, der in einer selektierten Mode (514,5nm) mit einer Leistung von ca. 700mW betrieben wird. Als Regelparameter dienen dabei die Etalontemperatur und die Position des Auskoppelspiegels, die mit einem Piezoring verändert werden kann. Die verbleibende Frequenzunsicherheit liegt so bei diesem System unter 1MHz. Das Laserlicht wird mittels einer optomechanischen Weiche in eine von drei Glasfasern (10m Länge, 10mm Kerndurchmesser) eingekoppelt, die mit den Lichtschnittgeneratoren verbunden sind. Dort wird ein Lichtschnitt durch Vergrößerung des Linearversatzes des Laserstrahls erzeugt, der beim Durchgang durch einen rotierenden Glaswürfel entsteht (Prinzip des abtastenden Lichtstrahls). Die dritte Komponente der DGV-Hardware ist das Kamerasystem, welches eine einzige Sammeloptik für beide CCD-Sensoren benutzt. Mittels eines Transferlinsenpaares und einem nicht-polarisierenden Strahlteiler wird das Zwischenbild auf die CCD-Chips übertragen, wobei in

einem der beiden Strahlengänge die Absorptionszelle platziert wird (Abb. 7). Durch Kühlung der CCD-Chips auf unter −15°C können Integrationszeiten zwischen 10 und 30 Sekunden erreicht werden, da der Dunkelstrom erheblich reduziert wird. Um die dreidimensionalen Geschwindigkeitsdaten aus den drei aufgenommenen Bilderpaaren für jeden Lichtschnitt zu rekonstruieren, sind eine Reihe von zusätzlichen Schritten notwendig. Störlicht aus der Umgebung sowie Reflektionen können erkannt werden, indem ein Hintergrundbild ohne Seedingzugabe aufgenommen wird. Ein weiteres Bildpaar, aufgenommen mit einheitlicher Beleuchtung ohne Absorptionseffekte, dient zur Korrektur der pixel-spezifischen Sensitivität der CCD-Kameras. Weitere numerische Korrekturen wie Entzerrung oder geometrische Überlagerung der Bilder können mit einem PC-System durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung des eingesetzten DGV-Systems findet man bei [8, 9]. Eine der wesentlichen Fehlerquellen liegt in den reflektierenden Flächen und Fenstern, die einen Teil des Laserlichtes aus einer anderen Richtung wieder in die Messebene zurückspiegeln und so eine zusätzliche, unerwünschte Verschiebung produzieren. Durch konstruktive Massnahmen an den optischen Zugängen (Strahlfallen, Verwendung von Antireflexbeschichtungen, Schwärzung von Oberflächen) lassen sich auch diese Störungen beseitigen.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen der hier vorgestellten Messungen wurden die Anzahl und Anordnung der Entnahmestutzen des Abblase-Luftsystems variiert, die Geometrie des Entnahmeschlitzes und des Verteilerkanals blieben hingegen unverändert. Untersucht wurde eine Konfiguration mit vier symmetrisch angeordneten Entnahmestutzen(Konfiguration 4), mit einem einzelnen Entnahmestutzen (Konfiguration 1), sowie mit zwei asymmetrisch angeordneten Entnahmestutzen (Konfiguration 2). Das Verhältnis von Verteilerkanalbreite zur Verteilerkanalhöhe beträgt 2:1, der Entnahmeschlitz ist um 45° gegenüber der Axialkanalachse angestellt. Die Abblaserate wurde bei jeder untersuchten Konfiguration beginnend bei M=4 % bis zur maximal möglichen Abblaserate gesteigert. Die Lage der jeweiligen Messebenen in den einzelnen Konfigurationen ist in Abbildung 8 skizziert.

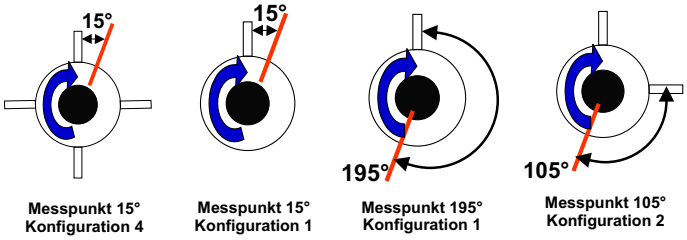

Abbildung 8: Positionen der Messstellen

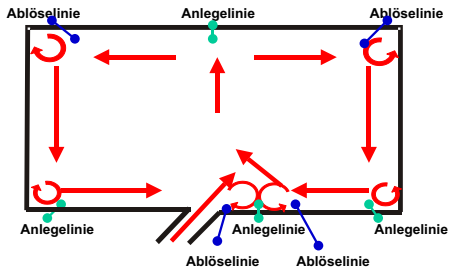

Abbildung 9: Modell der Verteilerkanalströmung

Die den laseroptischen Untersuchungen vorausgegangenen pneumatischen Messungen und Ölanstrichbilder im Verteilerkanal führten zu einem ersten Modell der Strömungstopologie im Verteilerkanal. Die Verläufe des statischen Drucks an den beiden Verteilerkanalseitenwänden in radialer Richtung (Abb. 10) weisen bei etwa 50 % Verteilerkanalhöhe das niedrigste Druckniveau auf, während zum Verteilerkanalboden und zur Verteilerkanaldecke hin das Druckniveau wieder ansteigt. Dies lässt auf eine rotierende Strömung im Verteilerkanal schliessen, wobei zunächst noch keine Aussage über die Drehrichtung sowie Anzahl der möglichen Wirbel getroffen werden kann. Auf dem Anstrichbild an der Verteilerkanaldecke (Abb. 11) ist etwa in der Kanalmitte deutlich eine Anlegelinie zu erkennen. Darüber hinaus wird durch den Verlauf der Stromlinien deutlich, daß sich der durch das Leitrad der Strömung aufgeprägte Drall durch den Entnahmeschlitz in den Verteilerkanal fortsetzt und dort zu einer umfangsgerichteten Durchströmung (Geschwindigkeitskomponente Vz) führt. Die Durchströmungsrichtung ist in Abbildung 8 eingezeichnet. Am Verteilerkanalboden zeigt sich eine sehr komplexe Kombination aus Anlegelinien und Ablöselinien. Daraus ergibt sich das Modell eines Zwei–Wirbel–Systems wie es in Abbildung 9 skizziert ist.

Abbildung 14 zeigt für Konfiguration 4 die Geschwindigkeitsverteilung im Verteilerkanalquerschnitt an der Messposition 15°, gemessen mit dem DGV-System bei einer eingestellten Abblaserate von 4 %. Deutlich zu erkennen sind zwei Wirbel, deren Zentren links und rechts des aus dem Entnahmeschlitz eintretenden Strahls angeordnet sind. Die Geschwindigkeiten in der Querschnittsebene des Verteilerkanals

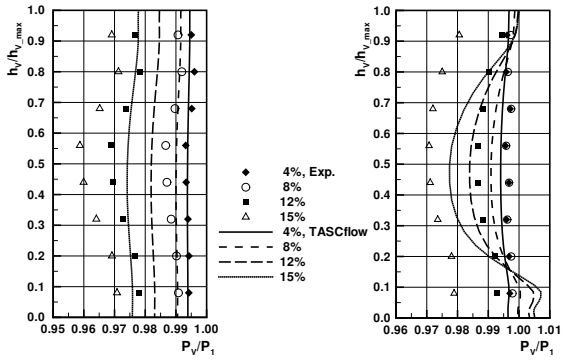

Abbildung 10: Druckverlauf Verteilerkanalseitenwand /M=4 %

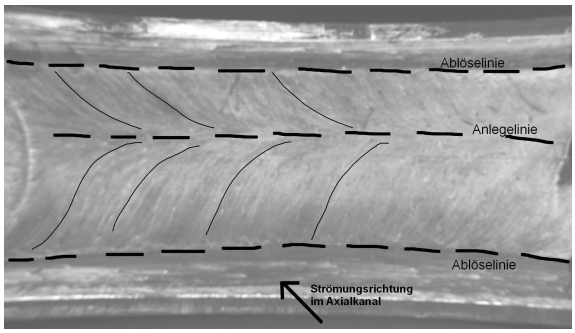

Abbildung 11: Anstrichbild Verteilerkanaldecke

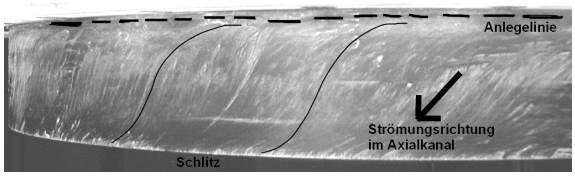

Abbildung 12: Anstrichbild Verteilerkanalboden stromauf

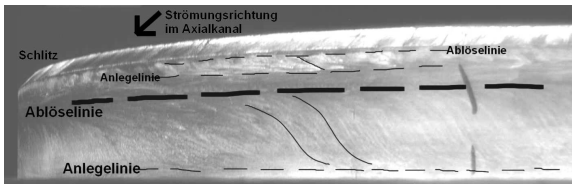

Abbildung 13: Anstrichbild Verteilerkanalboden stromab

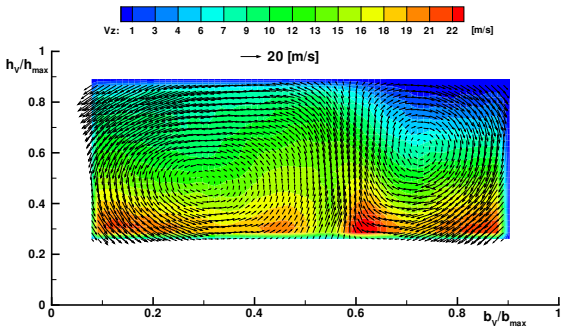

Abbildung 14: Konfig. 4,Pos. 15°,M=4 %

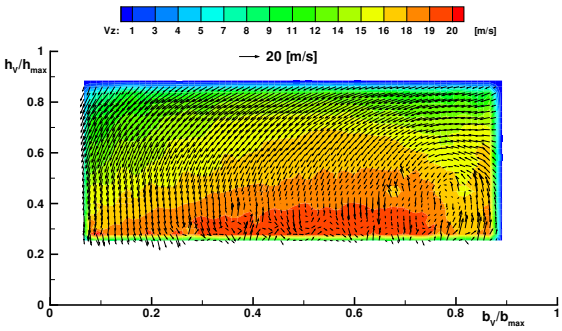

Abbildung 15: Konfig. 4,Pos. 15°,M=4 %

(Geschwindigkeitskomponente in Breitenrichtung: Vx, Geschwindigkeitskomponente in Höhenrichtung: Vy) steigen proportional mit dem Wirbelradius an. Der aus dem Entnahmeschlitz in den Verteilerkanal eintretende Strahl wird soweit umgelenkt, daß er etwa bei 60 % Kanalbreite nahezu senkrecht auf die Verteilerkanaldecke trifft. Die höchsten Umfangsgeschwindigkeiten Vz treten im Bereich des Verteilerkanalbodens, links und rechts Strahls auf, die niedrigsten Vz Werte sind im Bereich der Verteilerkanaldecke zu finden. Direkt unterhalb des Stutzens wird das vergleichsweise langsam durch den Verteilerkanal strömende Fluid zum Stutzen umgelenkt und auf die im Stutzen vorherrschende, wesentlich höhere Geschwindigkeit beschleunigt. Durch die daraus resultierende "Sogwirkung"wird in unmittelbarer Umgebung sämtliche Fluidmassen zum Stutzen umgelenkt. In der Messebene führt dies zu einem niedrigeren Geschwindigkeitsniveau im Bereich der Verteilerkanaldecke. Abbildung 15 zeigt das Ergebnis einer Wiederholungsmessung bei Abblaserate 4 %, bei dem jedoch nur noch ein Ein–Wirbel–System zu erkennen ist. Der in den Verteilerkanal eintretende Luftmassenstrom folgt der Umlenkung von der Schlitzseitenwand zum Verteilerkanalboden und löst nicht wie im vorausgegangenen Fall ab, so daß sich ein einziger, gegen den Uhrzeigersinn drehender Wirbel mit dem Zentrum bei 80 % Kanalbreite bildet. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten wiederum im Bereich des Verteilerkanalbodens auf, hier allerdings bei

50 % Verteilerkanalbreite. Zur Verteilerkanaldecke hin nehmen die Umfangsgeschwindigkeiten aufgrund des Einflusses des Stutzens wieder ab. Bei einer Steigerung der Abblaserate auf M=8 % lag bei allen durchgeführten Messungen, wie in Abbildung 16 ersichtlich, ein Ein–Wirbel–System vor. Das Wirbelzentrum liegt bei etwa 80 % Verteilerkanalbreite und 50 % Verteilerkanalhöhe. Während die Werte für die Geschwindigkeitskomponenten in der Querschnittsebene gegenüber Abblaserate 4 % nur unwesentlich zugenommen haben, steigen die maximalen Umfangsgeschwindigkeiten aufgrund des erhöhten Massendurchsatzes durch den Verteilerkanal auf knapp 30 m/s. Diese konzentrieren sich wiederum hauptsächlich nahe des Verteilerkanalbodens bei etwa 70% Verteilerkanalbreite. Zur Verteilerkanaldecke hin nehmen die Umfangsgeschwindigkeiten erwartungsgemäss wieder ab. Ab Abblaseraten grösser 10 % wurden ausnahmslos Zwei–Wirbel–Systeme detektiert. Bei Abblaserate 12 % (Abbildung 17) liegen die Wirbelzentren links und rechts des Strahls bei 20 % bzw. 80 % Verteilerkanalbreite und 55 % bzw 70 % Verteilerkanalhöhe. Die maximalen Umfangsgeschwindigkeiten konzentrieren sich im Bereich des Verteilerkanalbodens links und rechts des austretenden Strahls zwischen 20 bis 60 % sowie 70 bis 80 % Verteilerkanalbreite. Auffällig sind hier die im Bereich der Verteilerkanaldecke in der linken und rechten Ecke auftretenden Gebiete mit negativen Werten für die Umfangsgeschwindigkeit Vz. Ursache hierfür ist, wie schon bei niedrigeren Abblaseraten erkennbar, der Einströmvorgang in den Stutzen. Negative Vz Werte deuten darauf hin, daß die beiden Wirbel zur Messebene geneigt liegen. Nahezu die gleiche Strömungstopologie liegt bei Abblaserate 15 % vor. Unterschiede bestehen nur im Niveau der Geschwindigkeiten in der Querschnittsebene, das gegenüber Abblaserate 12 % deutlich zugenommen hat. Eine partielle Ausweitung des Bereiches mit negativen Vz-Geschwindigkeiten an der Verteilerkanaldecke und die Steigerung der dort vorherrschenden Geschwindigkeitswerte weisen auf eine stärkere Neigung der Wirbelachsen zur Querschnittsebene hin.
Da bei Konfiguration 1 der gesamte abgeblasene Massenstrom durch einen Stutzen ausströmt, wird deutlich mehr Fluid als bei Konfiguration 4 aus dem Verteilerkanal zum Stutzen umgelenkt. Entsprechend deutlicher wirken sich die Einflüsse des Einströmvorgangs auf den Bereich der Messposition 15° aus. So waren bei niedrigen Abblaseraten (<6 %) Messungen nur schwer möglich, da durch instationäre Strömungsvorgänge die Mittelung der einzelnen Geschwindigkeitswerte zu keinen sinnvollen Ergebnissen führte. Ab einer Abblaserate von 6 % (Abb. 19) konnte ein Ein–Wirbel–System detektiert werden, das auch bei höheren Abblaseraten bestehen blieb(Abb. 20, Abb. 21, Abb. 22). Bereits bei niedrigen Abblaseraten treten ausgedehnte Gebiete mit negativen Vz-Werten auf. Mit steigender Abblaserate sinkt das Geschwindigkeitsniveau in Umfangsrichtung, hingegen nehmen die negativen Vz Werte zu. Die Wirbel sind gegenüber der Messebene extrem geneigt. In grösserer Entfernung zum Entnahmestutzen schwächen sich die Auswirkungen des Einströmvorgangs in den Stutzen auf die Verteilerkanalströmung ab. So tritt bei Messposition 195° bereits bei Abblaserate 4 % das ursprünglich angenommene Zwei–Wirbel–System auf (Abb. 23), ebenso bei weiterer Steigerung der Abblaserate (Abb. 24). Die maximalen Umfangsgeschwindigkeiten treten im Bereich 20 % Verteilerkanalhöhe links und rechts neben dem Strahl auf, bei Steigerung der Abblaserate verlagert sich dieser Bereich in das Zentrum des linken Wirbels.
Die Messergebnisse für Konfiguration 4 und 1 verdeutlichen, daß in näherer Umgebung eines Entnahmestutzens der Einströmvorgang in den Stutzen großen Einfluss auf die Strömung im Verteilerkanal ausübt. Entscheidend für die Entstehung eines Ein–oder Zwei–Wirbel–Systems im Verteilerkanalquerschnitt ist die Art des Einströmens des Fluids vom Entnahmeschlitz in den Verteilerkanal. Folgt das eintretende Fluid der Umlenkung an der Schlitzaustrittskante und strömt entlang des Verteilerkanalbodens weiter, so entsteht ein Ein–Wirbel–System. Dieser Vorgang ist dem sogenannten "Coanda"–Effekt verwandt [10] [11]. Der eintretende Strahl reisst durch turbulenten Impulsaustausch Fluidpartikel aus dem Raum zwischen Verteilerkanalboden und Strahl mit und erzeugt dadurch einen Unterdruck zwischen Strahl und Platte. Dieser Unterdruck bewirkt, daß sich der Strahl zur Platte hin krümmt. Ein eindeutiger "Umschlagpunkt" vom Ein– zum Zwei–Wirbel–System konnte mit den DGV Messungen nicht festgestellt werden. Die Frage, wie weit stromab der Einfluss des Einströmvorganges reicht, lässt sich anhand der Messungen bei Konfiguration 2 an der Messposition 105° besser abschätzen. Bei Abblaserate 4 % liegt eine ähnliche Strömungstopologie vor, wie bei Messungen an Messposition 15° für Konfiguration 4 vor. Man erkennt ein Ein–Wirbel–System sowie hohe Umfangsgeschwindigkeiten im Bereich des Verteilerkanalbodens, die zur Verteilerkanaldecke hin abnehmen. Bereits ab einer Abblaserate von 8 % zeigt sich im rechten Bereich der Verteilerkanaldecke eine Zone mit negativen Umfangsgeschwindigkeiten. Demnach reicht der Einfluss der Stutzeneinströmung sehr weit stromab in den Verteilerkanal. Zu Berücksichtigen ist in jedem Fall die Anzahl der Entnahmestutzen, da dies den in einen einzelnen Stutzen einströmenden Massenstrom bestimmt.

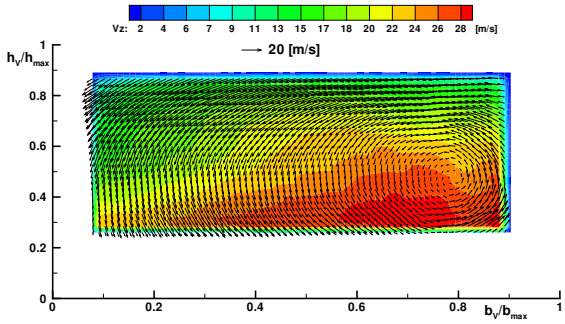

Abbildung 16: Konfig.4,Pos.15°,M=8 %

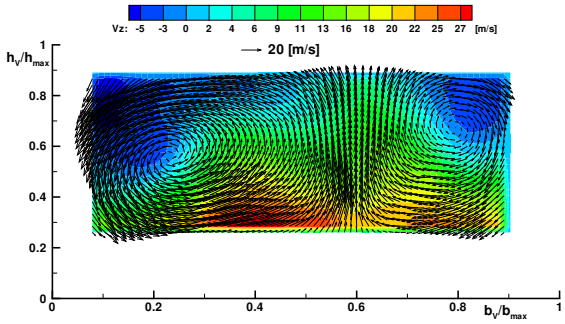

Abbildung 17: Konfig.4,Pos.15°,M=12 %

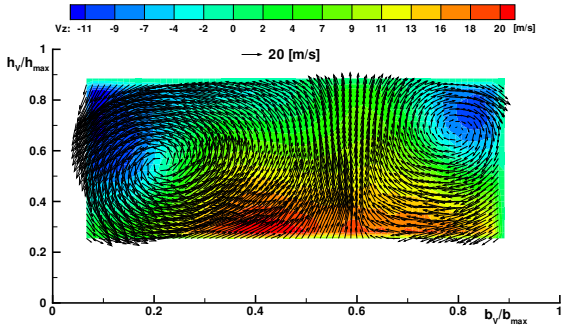

Abbildung 18: Konfig.4,Pos.15°,M=15 %

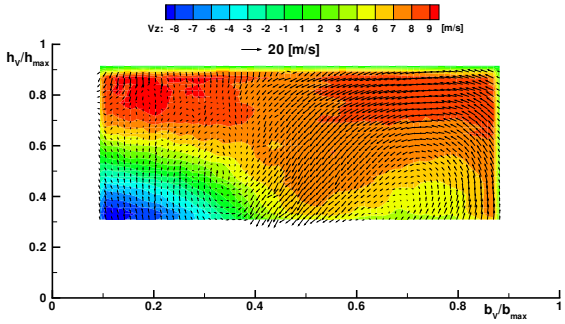

Abbildung 19: Konfig.1,Pos.15°,M=6 %

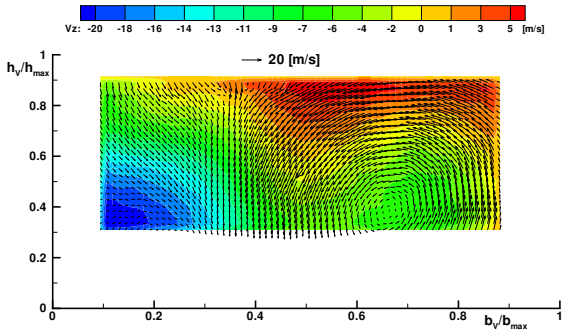

Abbildung 20: Konfig.1,Pos.15°,M=8 %

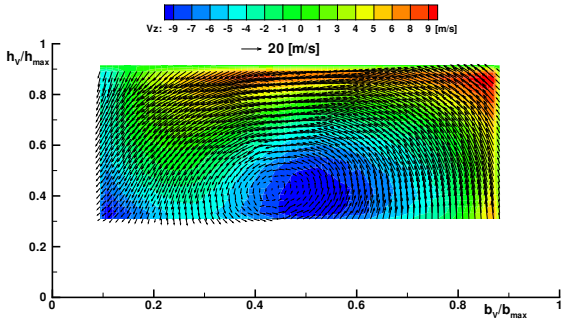

Abbildung 21: Konfig.1,Pos.15°,M=10 %

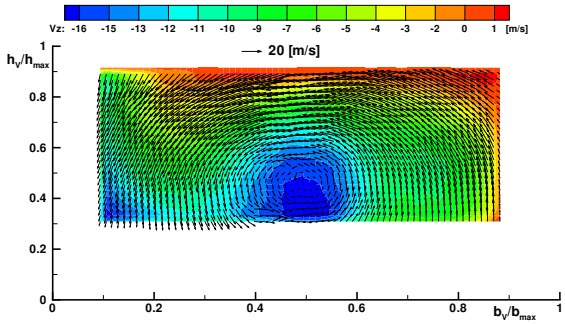

Abbildung 22: Konfig.1,Pos.15°,M=11 %

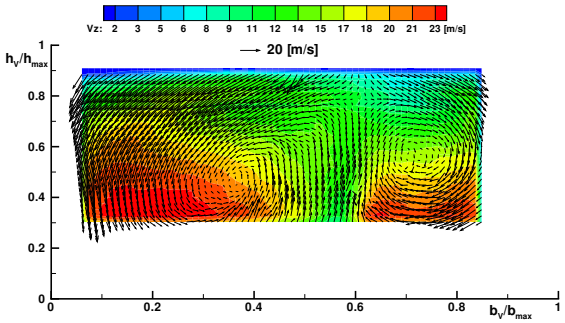

Abbildung 23: Konfig.1,Pos.195°,M=4 %

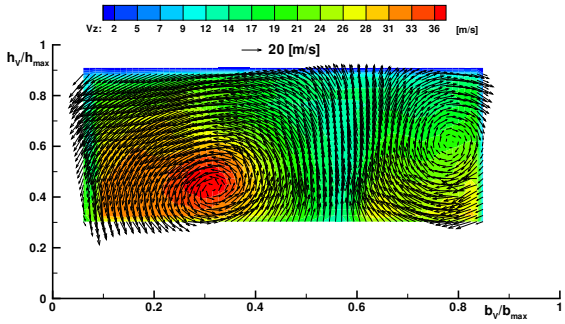

Abbildung 24: Konfig.1,Pos.195°,M=8 %

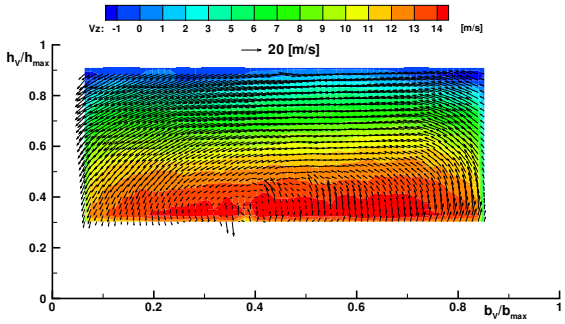

Abbildung 25: Konfig.2,Pos.105°,M=4 %

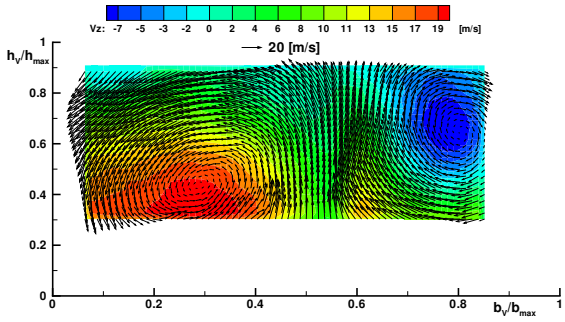

Abbildung 26: Konfig.2,Pos.105°,M=8 %

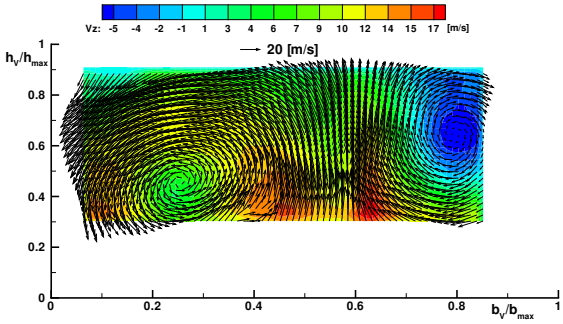

Abbildung 27: Konfig.2,Pos.105°,M=12 %

Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem für mehrstufige Axialverdicher typischen Abblase–Luftsystem wurde am Institut für Strahlantriebe der Universität der Bundeswehr München ein dreidimensionales Modell, bestehend aus den Komponenten Leitrad, Entnahmeschlitz, Verteilerkanal und Entnahmestutzen konzipiert, gebaut und in einen geschlossenen Windkanal integriert. Von besonderem Interesse war unter anderem die Strömungstopologie im Verteilerkanal, zu deren Untersuchung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Köln das Doppler Global Velocimetry Verfahren eingesetzt wurde. Im Verteilerkanal bildet sich in großer Entfernung zu einem Entnahmestutzen ein Zwei–Wirbel–System aus. Der aus dem Entnahmeschlitz in den Verteilerkanal eintretende Strahl löst hier vom Verteilerkanalboden ab und trifft nahezu senkrecht auf die Verteilerkanaldecke. In der näheren Umgebung des Entnahmestutzens beeinflusst der Einströmvorgang, abhängig von der Stutzenkonfiguration und dem abgeblasenen Massenstrom, maßgeblich die Strömungstopologie im Verteilerkanalquerschnitt. Zwei Phänomene treten dabei in den Vordergrund: Da unmittelbar unterhalb eines Stutzens das Fluid umgelenkt und auf die im Stutzen herrschende Geschwindigkeit beschleunigt wird, entsteht in der näheren Umgebung des Stutzens eine Sogwirkung, die zur Folge hat, daß im Bereich der Verteilerkanaldecke lokal begrenzte Zonen mit negativen Umfangsgeschwindigkeitskomponenten auftreten. Dies bedeutet, daß die Wirbel zur Messebene geneigt liegen. Bei niedrigen Abblaseraten löst der vom Entnahmeschlitz eintretende Strahl nicht mehr vom Verteilerkanalboden ab, sondern folgt der scharfen Umlenkung. Der Vorgang weist Parallelen zum bekannten "Coanda"–Effekt auf. Die Folge ist die Ausbildung eines Ein–Wirbel–Systems im Verteilerkanalquerschnitt. Ein eindeutiger Umschlagpunkt vom Ein– zum Zwei–Wirbel–System konnte mit dem DGV System nicht gemessen werden. Weiterführende Untersuchungen haben mittlerweile gezeigt, daß der Eintrömvorgang in den Stutzen einen nicht unerheblichen Anteil an den Gesamtdruckverlusten eines Abblase–Luftsystems hat. Sollte es gelingen mit geeigneten Massnahmen den Einströmvorgang in den Stutzen hinsichtlich Druckverluste zu optimieren so ist eine Reduzierung des gesamten Druckverlusts wahrscheinlich.

Literatur

[1] Miller, D.S., *Internal Flow Systems*, BHRA Fluid Engineering, 1978.

[2] Bowman, *Bleed Slot Efficiency*, PhD. Thesis, Cambridge University, 1996.

[3] Truckenbrodt, *Strömungsmechanik*, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 1968.

[4] Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., *Verzweigende Innenströmung*, Forschungsvorhaben Nr.91 und 113, 1989 und 1991.

[5] Müller T., *Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung einer Messstrecke zur experimentellen Untersuchung einer Abblasekonfiguration eines mehrstufigen Axialverdichters an einem Modell-Windkanal*, Diplomarbeit Nr. 2000/4.18, Universität der Bundeswehr München, Institut für Strahlantriebe, 2001.

[6] H.Komine, *System for measuring velocity field of fluid flow utilising a laser-Doppler spectral image converter*, US Patent 4 919 536, 1990.

[7] J.F. Meyers, H.Komine, *Doppler Global Velocimetry - A new way to look at velocity*, ASME Fourth International Conference on Laser Anemometry, Cleveland Ohio, August 1991.

[8] I. Roehle et al., *Recent developments and application of quantitative planar measurement techniques in turbomachinery components*, Measurement Science & Technology, Special Issue: Measuring techniques for turbomachinery 11 (7), July 2000.

[9] R. Schodl et al., *Doppler global velocimetry for the analysis of combustor flows*, Aerospace Science and Technology 6 (2002), pp. 481-493.

[10] R.Wille, H. Fernholz, *Report on the first European Mechanics Colloquium on the Coanda Effect*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 23, part 4, pp. 801-823.

[11] L. Prandtl, K.Oswatitsch, K. Wieghardt, *Führer durch die Strömungslehre*, Vieweg Verlag, 8. Auflage, 1984, p. 225

Danksagung

Die Autoren danken den Firmen MTU Aero Engines, München, Rolls Royce Deutschland GmbH, Dahlewitz, Alstom Power, Baden (Schweiz) sowie der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV e.V.) für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts und für die freundliche Genehmigung zur Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit.