

UNTERSUCHUNG DER SPALTSTRÖMUNG EINES EBENEN VERDICHTERGITTERS MITTELS DOPPLER-GLOBAL- VELOZIMETER MIT LASERFREQUENZMODULATION

INVESTIGATION OF THE TIP LEAKAGE FLOW IN A LINEAR COMPRESSOR CASCADE USING DOPPLER GLOBAL VELOCIMETRY WITH LASER FREQUENCY MODULATION

Andreas Fischer¹, Lars Büttner¹, Jürgen Czarske¹,
Marcel Gottschall², Ronald Mailach², Konrad Vogeler²

¹ Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden
E-Mail: andreas.fischer2@tu-dresden.de

² Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen
Institut für Strömungsmechanik, Professur für Turbomaschinen und Strahlantriebe
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Spaltströmung, Axialverdichter, DGV, Geschwindigkeitsfeldmessung
Tip leakage flow, axial compressor, DGV, velocity field measurement

Kurzfassung

Es wird die Geschwindigkeitsfeldmessung in einer Spaltströmung vorgestellt, wobei ein auf dem optischen Doppler-Effekt basierendes Messverfahren zum Einsatz kam. Dieses Doppler-Global-Velozimeter mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation gestattet die simultane Messung an 25 Punkten mit hoher Messrate bis 100 kHz. Dadurch können instationäre Geschwindigkeitsverteilungen in komplexen, turbulenten Strömungen, beispielsweise in Turbomaschinen, detailliert untersucht werden. Hierbei sind Messungen unerlässlich, um die Effizienz der Maschinen bei weiterhin stabilem Betrieb zu verbessern. Das Potential des FM-DGV-Messsystems für die Optimierung solcher Strömungen wird durch die Anwendung bei einer Spaltströmung in einem ebenen Verdichtergitter demonstriert. Hierbei wurde in der Spaltebene eine dreikomponentige (2d3k) Geschwindigkeitsmessung durchgeführt. Im Ergebnis wurde die Struktur des Spaltwirbels erfolgreich aufgelöst. Die gemessenen Standardabweichungen zeigen im Bereich des Spaltwirbels eine größere Turbulenz. Die zudem auswertbaren Turbulenzspektren zeigen Oszillation der Geschwindigkeit im Bereich einiger 10 Hz. Die so erhaltenen Daten sind essentiell für die Auslegung zukünftiger Axialverdichter.

Einleitung und Motivation

Für die Untersuchung von turbulenten, komplexen Strömungen in Turbomaschinen sind Geschwindigkeitsfeldmessungen mit hoher Zeitauflösung (< 1 ms) und mit geringer Messunsicherheit ($\ll 1$ m/s) notwendig. Die Strömungsanalyse dient der Optimierung der Strömungsmaschinen, wobei die Messdaten direkt zur Untersuchung der vorherrschenden Strö-

mungsphänomene oder indirekt zur Validierung von Simulationsmodellen genutzt werden. Beispielsweise bedürfen die in Axialverdichtern auftretenden Spaltströmungen aus heutiger Sicht einer genaueren Untersuchung, um Entwicklung und Ausprägung des Spaltwirbels sowie seine Auswirkung auf das Strömungsfeld und das Betriebsverhalten zu analysieren.

Als optische Geschwindigkeitsmessverfahren kamen in Turbomaschinen bereits das Laser-2-Fokus-Verfahren und die Laser-Doppler-Anemometrie erfolgreich zum Einsatz, was z. B. von Wisler 1976 und Förster et al. 2000 beschrieben ist. Da es sich hierbei jedoch um punktuelle Messverfahren handelt (0d-Messung), sind zeitaufwendige Verfahrertechniken notwendig, um das Geschwindigkeitsfeld (2d-Messung) in einer stationären bzw. periodischen Strömung zu messen. Demgegenüber ist die Particle-Image-Velocimetry (PIV) ein bildgebendes Messverfahren, welches ebenfalls z.B. von Voges et al. 2007 bereits in Turbomaschinen eingesetzt wurde. Zudem haben Henning und Ehrenfried 2008 gezeigt, dass sich mit PIV eine maximale Messrate von 20 kHz erreichen lässt. Die Testmessungen in den Nachlaufströmungen eines Gitters und eines Zylinders wurden mit den Messungen einer Hitzdrahtsonde verglichen. Im Ergebnis stimmten die aufgenommenen Turbulenzspektren bis 5 kHz überein. Nachteilig ist jedoch häufig bei dem Einsatz in Turbomaschinen, dass für die Messung der out-of-plane Komponente zwei Beobachtungsrichtungen benötigt werden (Stereo-PIV). Der optische Zugang ist meist derart eingeschränkt, dass nur ein geringer Winkelversatz zwischen beiden Beobachtungsrichtungen möglich ist, wodurch sich eine höhere Messunsicherheit als bei den in-plane Komponenten ergibt. Ausgehend von einer angenommenen Messabweichung der Partikelbewegung um 0,1 Pixel haben Voges et al. 2007 bei einem Winkelversatz der Beobachtungsrichtungen von 46° eine Messunsicherheit von 2 m/s und 1,5 m/s für die in-plane Komponenten und 3 m/s für die out-of-plane Komponente abgeschätzt. Mit kleineren Winkelversätzen vergrößert sich die Unsicherheit der out-of-plane Komponente.

Aus diesem Grund wurde von Wernet 2004 das Konzept eines hybriden Messsystems verfolgt: Mittels PIV werden die in-plane Komponenten und mittels Doppler-Global-Velozimetrie (DGV) die out-of-plane Komponente erfasst, so dass nur eine einzige Beobachtungsrichtung notwendig ist. Letztgenannte Technik wurde z.B. von Röhle et al. 2000 und Buchet 2002 auch schon bei der Untersuchung von Turbomaschinen eingesetzt, wobei jedoch Messunsicherheiten bis 4 m/s vorlagen. Zudem haben die eingesetzten DGV-Systeme eine geringe Messrate, die aufgrund der Bildrate der typischerweise eingesetzten CCD-Kameras etwa 10 Hz beträgt. Um den Nachteil der geringen Messrate zu überwinden, haben Cavone et al. 2006 anstelle der CCD-Kameras Photovervielfacher eingesetzt und so eine Messrate von 67 kHz realisiert. Allerdings wurde dabei lediglich eine Punktmessung umgesetzt.

Als Weiterentwicklung wurde schließlich von Fischer et al. 2007 ein DGV-Messsystem mit Laserfrequenzmodulation (FM) vorgestellt, wobei ein Avalanche-Photodioden-Array (APD-Array) zum Einsatz kommt. Im Vergleich zu Photovervielfachern erlauben APDs einen kostengünstigeren, kompakteren Aufbau eines Detektorarrays, so dass im Ergebnis eine simultane Messung an 25 Punkten möglich ist und zudem eine hohe Messrate von 100 kHz erzielt wird. Das zugrunde liegende Messprinzip und die Messeigenschaften werden im nächsten Abschnitt kurz umrissen. Danach folgt die Beschreibung einer erstmaligen Anwendung des FM-DGV-Messsystems bei der Untersuchung der Spaltströmung eines ebenen Verdichtergitters. Hierbei ist erstmals eine flächige, dreikomponentige (2d3k) FM-DGV-Geschwindigkeitsmessung durchgeführt worden, so dass sich die Strömungsstruktur eingehend analysieren lässt. Die hohe Messrate des Messsystems gestattet zusätzlich eine Turbulenzauswertung.

Das Messsystem: FM-DGV Messprinzip und Charakterisierung

Eine ausführliche Beschreibung des Messprinzips kann den Publikationen von Fischer et al. 2007, 2008a, 2008b entnommen werden. Das Messprinzip sei deshalb hier nur kurz umrissen. Gemäß der in Abb. 1a skizzierten Messanordnung beleuchtet ein Laserlichtschnitt die zu vermessende Strömungsebene, wobei die Frequenz des Lasers sinusförmig moduliert ist. Das von Partikeln in die Beobachtungsrichtung gestreute Laserlicht wird durch eine Absorptionzelle hindurch mit einem Photodetektorarray orts aufgelöst gemessen. Die Mittenfrequenz dieses Streulichts ist aufgrund des Doppler-Effektes direkt proportional zur Strömungsgeschwindigkeit verschoben (vgl. Abb. 1a). Wegen der spektralen Transmissionscharakteristik der Absorptionzelle und der sinusförmigen Laserfrequenzmodulation (s. Abb. 1b) ändern sich die Amplituden der ersten und zweiten Harmonischen des Detektorsignals und damit auch deren Verhältnis. Dieses Amplitudenverhältnis ist unabhängig von der mittleren Streulichtleistung und dient daher zur Geschwindigkeitsmessung. Mit einer Lasereinfalls- und Beobachtungsrichtung wird eine Komponente der Geschwindigkeit erfasst. Demzufolge sind für dreikomponentige Geschwindigkeitsmessungen beispielsweise zwei weitere Lasereinfallsrichtungen notwendig.

Im Vergleich zu konventionellen DGV-Systemen ohne Laserfrequenzmodulation bedarf es keines Strahlteilers und einer zweiten Kamera, um den Einfluss der Streulichtintensität explizit zu messen und zu korrigieren. Dadurch entfallen bei dem FM-DGV-Verfahren Bildausrichtungs- und Strahlteilungsfehler. Letztere können gemäß Charrett et al. 2006 bei einem konventionellen DGV-System zu Messabweichungen bis 7 m/s führen.

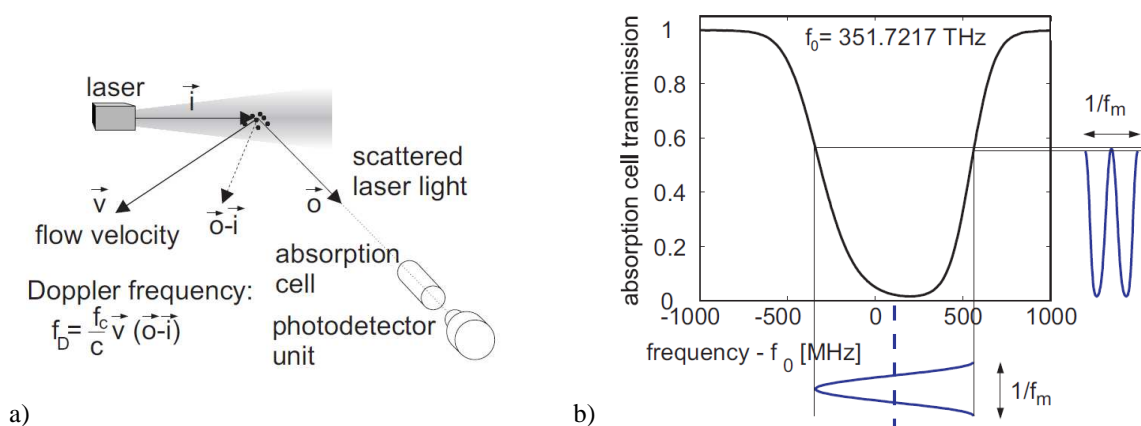


Abb. 1 a) Messaufbau beim FM-DGV-Verfahren und Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Doppler-Frequenzverschiebung und b) Darstellung der sinusförmigen Laserfrequenzmodulation anhand der gemessenen Transmissionskennlinie einer mit Cäsiumgas gefüllten Absorptionzelle (Modulationsamplitude $f_h = 450$ MHz, Modulationsfrequenz f_m , Lasermittenfrequenz f_c , Doppler-Frequenz f_D , Lasermittenfrequenz des Streulichts $f_c + f_D - f_0 = 131,5$ MHz, Lichtgeschwindigkeit c)

Eine ausführliche Beschreibung des FM-DGV-Messsystemaufbaus und der Charakterisierung des Messsystems findet sich z.B. in Fischer 2009a und Fischer et al. 2009b, 2009c. Als Lichtquelle wird ein DFB-Laser der Wellenlänge 852,1 nm mit max. 126 mW Ausgangsleistung genutzt. Die Wellenlänge stimmt mit der von Cäsium-Absorptionslinien überein, weshalb mit Cäsiumgas gefüllte Absorptionzellen eingesetzt werden. Der Laser ist hinreichend schmalbandig (Linienhalbwertsbreite < 3 MHz), um das Transmissionsprofil der Cäsium-Absorptionslinien auflösen zu können (s. Abb. 1b). Er gestattet zudem über den Diodenstrom

eine schnelle Laserfrequenzmodulation. Die gewählte Modulationsfrequenz beträgt 100 kHz und die Modulationsamplitude ca. 450 MHz. Die Modulationsfrequenz ist größer als die Grenzfrequenz der im Experiment auftretenden Streulichtfluktuationen, so dass gemäß Fischer et al. 2008b kein Störeinfluss durch die Streulichtfluktuationen zu erwarten ist. Zur Photodetektion wird ein Array bestehend aus 25 fasergekoppelten Lawinenphotodetektoren verwendet, welche eine 3-dB-Bandbreite von 450 kHz aufweisen und so die 1. und 2. Harmonische der Lichtsignale auflösen können. Die Messpunkte sind hier linear angeordnet, um eine Maximierung der Laserintensität zu ermöglichen. Hierfür wurde die Lichtschnitthöhe derart reduziert, dass anstelle eines Lichtschnitts letztlich ein kollimierter Laserstrahl vorlag. Die laterale und axiale Ortsauflösung beträgt ca. 930 μm .

Die max. Messrate ist gleich der Modulationsfrequenz 100 kHz, weil mindestens eine Periode der Modulation ausgewertet werden muss. Der Zusammenhang zwischen der Messzeit T , der auf ein Detektor fallenden Streulichtleistung P_s und der Standardabweichung σ_v der Geschwindigkeit lässt sich nach Fischer et al. 2009d wie folgt abschätzen:

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{T/s}} \cdot \sqrt{\frac{(0,0084 \text{ m/s})^2}{(P_s/nW)^2} + \frac{(0,0051 \text{ m/s})^2}{P_s/nW}} \quad (1)$$

Die beiden Summanden resultieren aus dem bei der Photodetektion auftretenden thermischen bzw. Dunkelstromrauschen (signalunabhängig) und dem signalabhängigen Schrotrauschen. Das Messsystem wurde von Fischer et al. 2009d bereits erfolgreich bei instationären Düsenströmungen, Zylindernachlaufströmungen und Gitterturbulenzen eingesetzt, wobei Turbulenzspektren erfasst worden sind.

Die Messaufgabe: Spaltströmungen in Axialverdichtern

Axialverdichter werden z.B. in stationären Gasturbinen und Flugzeugtriebwerken häufig eingesetzt und sind daher von besonderem Interesse. Die Spaltströmung ist von entscheidender Bedeutung für den Verdichterentwurf und -betrieb wegen ihrer schädlichen Auswirkungen auf die Effizienz und den Druckanstieg durch den Blockage-Effekt der Leakageströmung selbst und des daraus in der Passage entstehenden Spaltwirbels. Weiterhin spielt die Spaltströmung eine wichtige Rolle für Strömungsstabilität und stellt einen Parameter für die Auslösung der sogenannten „Rotierenden Ablösung“ dar.

Die Strömung im Bereich der freistehenden Enden der Stator- bzw. Rotorschaukeln wird wesentlich durch den Spaltwirbel (engl. tip clearance vortex TCV) geprägt. Der TCV entsteht durch den konstruktiv bedingten Spalt zwischen den Schaukeln und Gehäuse bzw. der rotierenden Nabe des Verdichters. Die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten einer Schaufel treibt das Fluid durch diesen Spalt von der Druckseite (PS) in Richtung Saugseite (SS). Dort trifft es auf die Hauptströmung und es bildet sich ein spiralförmig ausgeprägter Wirbel: der TCV (s. Abb. 2). Durch die Wechselwirkung mit der Hauptströmung wird diese blockiert und in radialer und Umfangsrichtung umgelenkt. Die Eigenschaf-

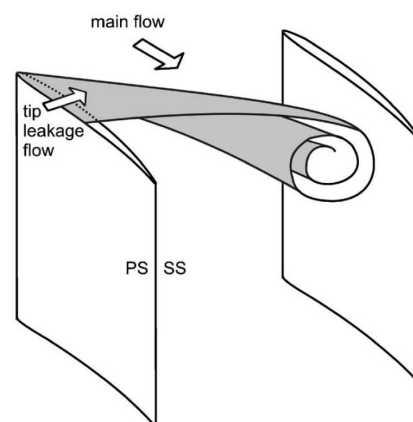


Abb. 2: Entstehung der Spaltströmung, Mailach et al. 2008

ten des TCV hängen von verschiedenen geometrischen und aerodynamischen Parametern ab, was z.B. von Gottschall et al. 2011 für verstellbare Statorschaufeln beschrieben wird.

Im Ergebnis ist ein vertieftes physikalisches Verständnis der Spaltströmung notwendig, um die Effizienz von Turboverdichtern zu steigern und einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Deshalb wird momentan daran geforscht, die instationären Effekte in der Spaltströmung zu messen und ein vollständiges Geschwindigkeitsfeld dieser dreidimensionalen Strömung aufzunehmen. Nachfolgend wird hierfür erstmalig der Einsatz des FM-DGV-Messsystems zur 2d3k-Geschwindigkeitsmessung in einer Spaltströmung vorgestellt.

Der Messaufbau: Das ebene Verdichtergitter

Das linear montierte Verdichtergitter besteht aus sieben identischen zylindrischen Statorprofilen eines modernen Axialverdichters. Der Aufbau des sogenannten Gitterwindkanals ist in der Abb. 3 schematisch dargestellt. Der Windkanal arbeitet als offener Saugkanal, da der Antrieb an der Ausgangsseite angebracht ist. Dadurch werden eingangsseitig geringe Turbulenzgrade von $< 1\%$ erzielt. Um den TCV zu verstärken, wurde abweichend vom normalen Betriebspunkt der Anströmwinkel α_1 um 15° reduziert. Durch diese Erhöhung der Inzidenz wird die aerodynamische Belastung der Schaufel gesteigert so dass ein Betriebspunkt nahe des Strömungsabrisses modelliert wurde. Dabei tritt der oben beschriebene Blockage-Effekt auf und die Spaltströmung ist aufgrund des großen Druckgefälles zwischen der Druckseite und der Saugseite verstärkt. Die grundlegenden Parameter der Verdichterkaskade sind in der Tabelle 1 benannt.

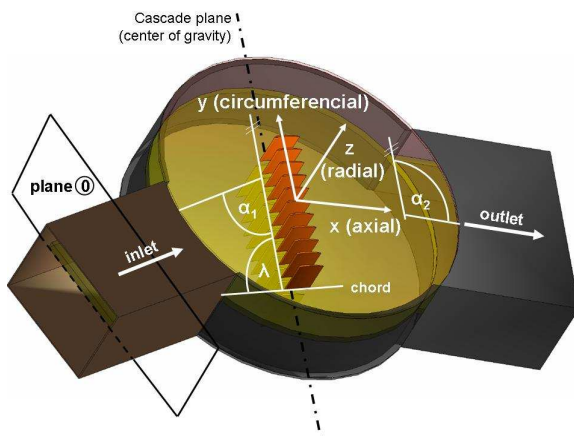


Abb. 3: Aufbau des Gitterwindkanals

Zuströmgeschwindigkeit [m/s]	c_0	38
Reynoldszahl	Re	410000
Staffelungswinkel [°]	λ	116
Zuströmwinkel [°]	α_1	29
Gitterumlenkung [°]	$\Delta\alpha$	45
Schaufelhöhe [mm]	h	300
Teilung [mm]	t	90,1
Sehnenlänge [mm]	l	153,5
Spaltweite [mm]	s	8
Abstand Messebene-Seitenwand [mm]		4

Tab. 1: Parameter des Versuchsaufbaus

Die Ergebnisse: 2d3k-FM-DGV-Messung

Um den TCV aufzulösen, wurden drei Geschwindigkeitskomponenten sequentiell mit drei unterschiedliche Lasereinfallsrichtungen $\vec{i}_1, \vec{i}_2, \vec{i}_3$ gemessen (s. Abb. 4a). Hierfür sind Spiegel im Windkanal außerhalb der äußeren Schaufeln 1 und 7 und hinter einem Leitblech derart angebracht worden, dass keine Strömungsbeeinflussung im Messbereich vorlag. Die FM-DGV-Messung erfolgte schließlich an der inneren Schaufel Nummer 4. Jeder Laserstrahl passierte dabei rechtwinklig die 30 mm starke Plexiglasdeckplatte des Kanals und wurde mit Hilfe der Spiegel dann um 90° umgelenkt. Im Ergebnis verläuft der einfallende Laserstrahl parallel zur Deckplatte des Kanals in einem Abstand von 4 mm, d.h. in der Mitte des Spalts. Die Beobachtungsrichtung blieb stets senkrecht zur Deckplatte. Das Streulicht wurde durch die Plexiglasplatte detektiert. Sowohl die Empfangseinheit als auch der jeweils einfallende Laserstrahl wurden in der x-y-Ebene traversiert, so dass im Ergebnis eine 2d3k-

Geschwindigkeitsmessung erfolgte. Das Seeding (Material: DEHS, Partikeldurchmesser 1 μm) wurde an der Oberseite des Kanaleinflaßes lokal zugeführt.

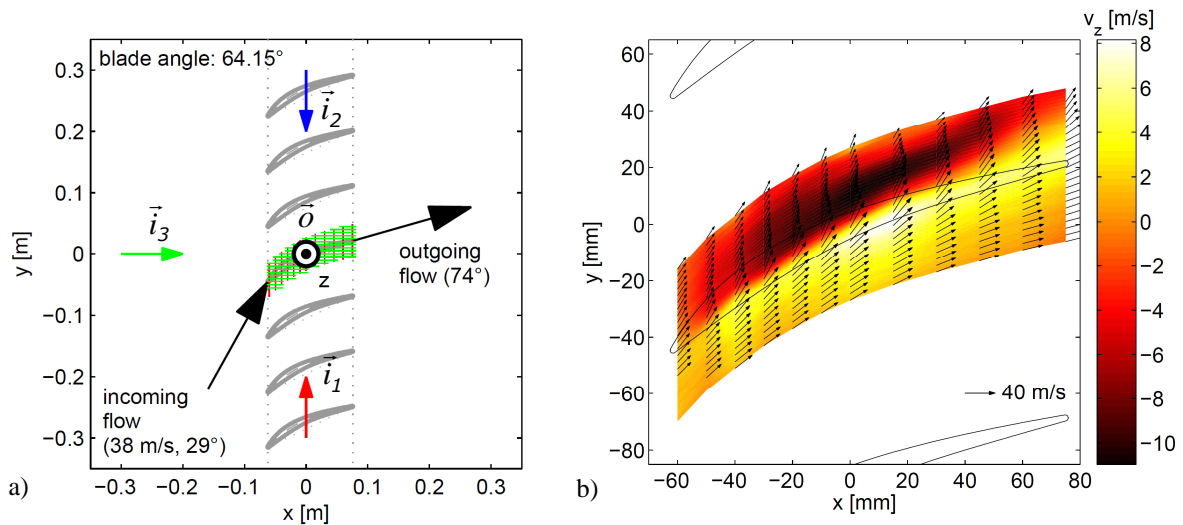


Abb. 4: a) FM-DGV Messanordnung und b) gemessenes Geschwindigkeitsfeld der drei Komponenten v_x , v_y , v_z der Spaltströmung

Bei jeder einzelnen Messung (1d1k) wurde zweimal 2 s lang gemessen. Dadurch sind zufällige Messunsicherheiten vernachlässigbar klein, da sie gemäß der Gl. (1) für eine Streulichtleistung von 0,5 nW lediglich zu einer Standardabweichung von 1 cm/s führen. Nach einem Zusammenfügen der einzelnen Geschwindigkeitsprofile und einer Koordinatentransformation erhält man das in der Abb. 4b dargestellte mittlere Geschwindigkeitsfeld. Die z-Komponente der Geschwindigkeit (Farbkodierung) zeigt deutlich, dass die Spaltströmung auf der Druckseite zum Spalt hin in positiver z-Richtung und auf der Saugseite in negativer z-Richtung in die Passage verläuft. Aufgrund des Aufrollens des TCV findet sich zudem am Ende der Saugseite eine entgegengesetzt orientierte Strömung in z-Richtung. Bemerkenswert ist, dass die Strömung im zeitlichen Mittel gut dem Schaufelprofil folgt, obwohl ein großer Anstellwinkel vorliegt. Dies gilt besonders auf der Druckseite, wohingegen sich auf der Saugseite der Einfluss des TCV bemerkbar macht.

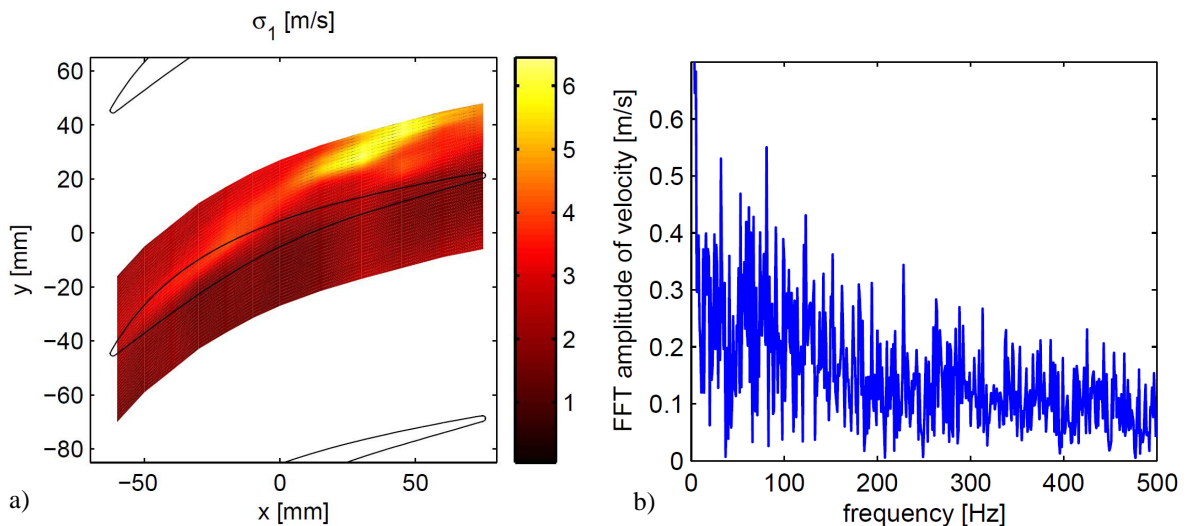


Abb. 5: a) Standardabweichung der Geschwindigkeit entlang der Richtung $(\vec{\sigma} - \vec{i}_1)$ und b) das Amplitudenspektrum bei $x = 15 \text{ mm}$, $y = 26,8 \text{ mm}$ als Beispiel

Die für eine Messrate von 1 kHz gemessene Standardabweichung ist exemplarisch für die erste Geschwindigkeitskomponente in der Abb. 5a dargestellt. Die Werte liegen deutlich über der gemäß der Gl. (1) abgeschätzten Messunsicherheit, die aufgrund der erreichten Streulichtleistung $> 0,5 \text{ nW}$ bei der verwendeten Zeitauflösung von 1 ms unter $0,6 \text{ m/s}$ liegt. Folglich rührt die dargestellte Turbulenz maßgeblich von der Strömung her. Offensichtlich liegen auf der Saugseite und im speziellen im Bereich des TCV große Geschwindigkeitsfluktuationen mit Standardabweichungen bis 6 m/s vor, wohingegen auf der Druckseite eine nahezu konstante Standardabweichung von rund 2 m/s auftritt. Ein beispielhaftes Geschwindigkeitsspektrum für die Position $x = 15 \text{ mm}$, $y = 26,8 \text{ mm}$ ist in der Abb. 5b gegeben. Hier fällt auf, dass (übereinstimmend mit benachbarten Kanälen) die Frequenzanteile 32 Hz und 81 Hz hervortreten. Bei der zweiten Messung ergaben sich hingegen andere dominante Frequenzanteile, was darauf hindeutet, dass die Strömung ausgeprägt instationär ist. Diese Vermutung konnte bereits mit einem Wollfadenversuch qualitativ bestätigt und soll noch anhand gegenwärtig durchgeführter Druck- und Hitzdrahtmessungen verifiziert werden. Ungeachtet dessen zeigen die Messergebnisse, dass die FM-DGV-Messung zur Strömungsanalyse des Spaltwirbels wichtige Beiträge liefert.

Zusammenfassung

Die Strömungsanalyse von nicht-stationären, turbulenten Strömungen, wie beispielsweise in Turbomaschinen, bedarf berührungslos arbeitender Messtechniken, die Geschwindigkeitsfelder mit hoher Messrate und geringer Unsicherheit erfassen können. Hierfür wurde ein Doppler-Global-Velozimeter mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) vorgestellt, welches im Vergleich zu einem konventionellen DGV keine Referenzkamera benötigt, so dass Messabweichungen aufgrund von Bildausrichtungsfehlern und Strahlteilungsfehler eliminiert sind. Zudem wurde die üblicherweise zur Photodetektion genutzte CCD-Kamera durch eine 25-elementiges fasergekoppeltes Avalanche-Photodiodenarray ersetzt. Zum Einen konnte durch die geringe Anzahl von Messpunkten der beleuchtende Laserlichtschnitt stark verkleinert und so die Laserintensität drastisch gesteigert werden. Hierfür wurden die Messpunkte linear angeordnet. Dadurch wurde eine geringe Messunsicherheit von $0,04 \text{ m/s}$ in einer Kalibrierströmung erzielt. Zugleich ermöglicht die hohe Bandbreite der Detektoren hohe Messraten bis 100 kHz , so dass Turbulenzanalysen möglich sind.

Das FM-DGV-Messsystem wurde erstmals zur Messung einer Spaltströmung in einem ebenen Verdichtergitter eingesetzt. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgte für ein FM-DGV-System ebenfalls erstmalig dreikomponentig in einer Messebene ($2d3k$). Die Feldmessung wurde durch eine Traversierung und die Messung von drei Komponenten durch drei sequentiell ausgewertete Lichteinfallrichtungen erreicht. Im Ergebnis konnte in dem Gitterwindkanal der Spaltwirbel auf der Saugseite der betrachteten Schaufel aufgelöst und charakterisiert werden. Der Spaltwirbel dehnt sich hier nicht bis zur benachbarten Schaufel aus, so dass auf der Druckseite eine homogene, dem Profil der Schaufel gut folgende Strömung vorliegt. Eine Auswertung der Standardabweichung der Geschwindigkeiten führt zu deutlich vergrößerten Werten von 6 m/s im Bereich des Spaltwirbels auf der Saugseite, wohingegen auf der Druckseite nahezu homogen 2 m/s gemessen wurden. Die gemessenen Geschwindigkeitsspektren zeigen beachtliche Oszillationen im Bereich bis 100 Hz . Damit ist bestätigt, dass sich das FM-DGV-Messsystem für die Untersuchung komplexer, instationärer, turbulenter Strömungen eignet und insbesondere für Turbulenzuntersuchungen vorteilhaft ist.

Dankesworte

Die Autoren danken Thomas Staude und Florian Sell für ihre tatkräftige Unterstützung bei den Experimenten am Gitterwindkanal. Zudem gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft

für die Förderung des Projektes „Zeitlich hochauflösendes Doppler-Global-Velozimeter zur Turbulenzspektrenmessung“ (DFG-Projekt Cz55/22-1) unser besonderer Dank.

Literatur

- Buchet, H., 2002: „Contribution au développement d'un Vélocimètre Global à effet Dopplereen vue de l'application aux turbomachines“, École central de Lyon, Dissertation
- Cavone, A. A., Meyers, J. F., Lee, J. W., 2006: „Development of point Doppler velocimetry for flow field investigations“, 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, No. 21.2 (13 S.)
- Charrett, T. O. H., Tatam, R. P., 2006: „Single camera three component planar velocity measurements using two-frequency planar Doppler velocimetry (2v-PDV)“, *Meas. Sci. Tech.* 17: 1197 – 1206
- Fischer, A., 2009a: „Beiträge zur Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation – Präzise Messung von Geschwindigkeitsfelder in turbulenten Strömungen mit hoher Zeitaufösung“, Shaker, Aachen, ISBN 978-3-8322-8370-4
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009b: „Array Doppler Global Velocimeter with Laser Frequency Modulation for Turbulent Flow Analysis – Sensor investigation and application“, in: *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis* (Eds. W. Nitsche, C. Dobriloff), Springer, Berlin, S. 31-41
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009c: „Measurements of velocity spectra using time-resolving Doppler global velocimetry with laser frequency modulation and a detector array“, *Exp. Fluids* 47: 599–611
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2009d: „Turbulenz- und Korrelationsuntersuchungen mit einem Doppler-Global-Array-Velozimeter“, 17. Fachtagung zu Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Erlangen, No. 2 (13 S.)
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2008a: „Measurement uncertainty and temporal resolution of Doppler global velocimetry using laser frequency modulation“, *Applied Optics* 47(21): 3941 – 3953
- Fischer, A., König, J., Czarske, J., 2008b: „Speckle noise influence on measuring turbulence spectra using time-resolved Doppler global velocimetry with laser frequency modulation“, *Meas. Sci. Tech.* 19: 125402 (15 S.)
- Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Grosche, G., Müller, H., 2007: „Investigation of time-resolved single detector Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation“, *Meas. Sci. Tech.* 18: 2529 – 2545
- Förster, W., Karpinsky, G., Krain, H., Röhle, I., Schodl, R., 2000: „3-Component-Doppler-Laser-Two-Focus Velocimetry Applied to a Transonic Centrifugal Compressor“, 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, No. 7.2 (12 S.)
- Gottschall, M., Mailach, R., Vogeler, K., 2011: „Effect of different penny gap geometries on performance and development of secondary flow field in a compressor cascade“, 9th European Turbomachinery Conference, Istanbul (21.3. – 25.3.), wird veröffentlicht
- Henning, A., Ehrenfried, K., 2008: „On the accuracy of one-point and two-point statistics measured via high-speed PIV“, 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, No. 1.1.2 (16 S.)
- Mailach, R., Lehmann, I., Vogeler, K., 2008: „Periodical Unsteady Flow Within a Rotor Blade Row of an Axial Compressor—Part II: Wake-Tip Clearance Vortex Interaction“, *Journal of Turbomachinery* 130: 041005 (10 S.)
- Röhle, I., Schodl, R., Voigt, P., Willert, C., 2000: „Recent developments and applications of quantitative laser light sheet measuring techniques in turbomachinery components“, *Meas. Sci. Tech.* 11: 1023-1035
- Voges, M., Beversdorff, M., Willert, C., Krain, H., 2007: „Application of particle image velocimetry to a transonic centrifugal compressor“, *Experiments in Fluids* 43: 371–384
- Wernet, M. P., 2004: „Planar particle imaging Doppler velocimetry: a hybrid PIV/DGV technique for three-component velocity measurements“, *Meas. Sci. Tech.* 15: 2011-2028
- Wisler, D. C., 1976: „Shock wave and flow velocity measurements in a high speed fan rotor using the laser velocimeter“, *ASME Journal of Engineering for Power* 99: 181-188