

Spaltströmungsmessungen an Turbinenrotorschaukeln mit Squealer

Tip leakage flow measurements at turbine rotors with squealers

**Andreas Fischer, Jörg König, Jürgen Czarske,
Clemens Rakenius*, Gregor Schmid*, Heinz-Peter Schiffer***

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik
Helmholtzstraße 18, 01069 Dresden
E-Mail: andreas.fischer2@tu-dresden.de

*Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe,
Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt
E-Mail: rakenius@glr.tu-darmstadt.de

Turbomaschine, 2d3k-Strömungsmessung, hohe Messrate, Laserfrequenzmodulation
Turbomachine, 2d3c flow measurement, high measurement rate, laser frequency modulation

Zusammenfassung

In Turbomaschinen treten beispielsweise zwischen den Rotorschaukelspitzen und dem Gehäuse Leckageströmungen auf, die zu Wirkungsgradverlusten führen. Zur Reduzierung dieser Verluste werden aktuell sogenannte Squealer, d. h. Vertiefungen an den Schaukelspitzen angebracht. Um das Potenzial dieser Technik ausschöpfen zu können, bedarf es eines tieferen Verständnisses zum Spaltströmungsverhalten. Dabei stellen die wegen der geringen Spalttiefe von typischerweise 1 mm auftretenden Reflexionen als auch die wegen der Schaukeldurchtrittsfrequenz von ca. 1 kHz erforderliche hohe Zeitauflösung große Herausforderungen für die optische Strömungsmesstechnik dar. Deshalb wird über die mittels Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation erstmals durchgeführte bildgebende, dreikomponentige Spaltströmungsmessung an einem Turbinenversuchsstand berichtet. Hierbei wurde die Spaltströmung an den Blattspitzen eines Turbinenrotors mit Squealer im Arbeitspunkt, d.h. bei einer Schaukeldurchtrittsfrequenz von 930 Hz gemessen. Die Messungen stimmen mit Strömungssimulationen qualitativ sehr gut überein, wobei z. B. die Entwicklung des Spaltwirbels im Schaukelnachlauf als auch die Strömungsstrukturen über dem Squealer aufgelöst wurden.

Motivation

In einer deckbandlosen Turbine reduziert der fertigungsbedingte Spalt zwischen Rotor und Gehäuse und die dabei entstehende Spaltströmung die Effizienz der Strömungsmaschine. Gemäß Denton 1993 beruht die Effizienzmindern durch die Spaltströmung im Wesentlichen auf zwei Effekten: der unmittelbaren Leckage und dem Turbulenzeintrag in die Hauptströmung. Beides verursacht signifikante Maschinenverluste, wobei z. B. das letztgenannte Phänomen für bis zu 30 % der gesamten aerodynamischen Verluste verantwortlich gemacht wird. Um diese Verluste zu reduzieren, werden unter anderem aktuell Rotorschaukeln mit sogenannten Squealern eingesetzt, siehe Padova et al. 2011. Als Squealer wird hierbei die

an einer Rotorschaufelspitze befindliche Vertiefung bezeichnet. Zur Veranschaulichung ist die hier untersuchte Turbinenrotorschaukel mit Squealer in der Abb. 1 dargestellt.

Durch den Squealer lässt sich eine Reduzierung des Spaltmassenstroms erreichen, wobei beispielsweise Ameri et al. 1998 anhand einer numerischen Untersuchung eine Reduzierung um 14 % nachwies. Neben einer Vielzahl an numerischen Studien fanden auch bereits optische Messungen in Kaskadenwindkanälen statt. Bei diesem Modellversuch ruhen die Rotorschaukeln, sind linear angeordnet und der Spalt beträgt dank einer leicht umzusetzenden Skalierung typischerweise mehrere bzw. mehrere zehn Millimeter. Diesbezüglich sind die mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) durchgeführten Spaltströmungsmessungen von Palafox et al. 2012 hervorzuheben, wo die Relativbewegung zwischen Rotorschaukel und Gehäuse durch eine bewegte Gehäusefläche modelliert wurde. Spaltströmungsmessungen an einem realen, rotierenden Turbinenrotor mit Squealer fehlen bislang und somit auch die Möglichkeit zur Validierung der Spaltströmungssimulationen. Deswegen ist das Potenzial der Squealertechnik bislang nicht geklärt.

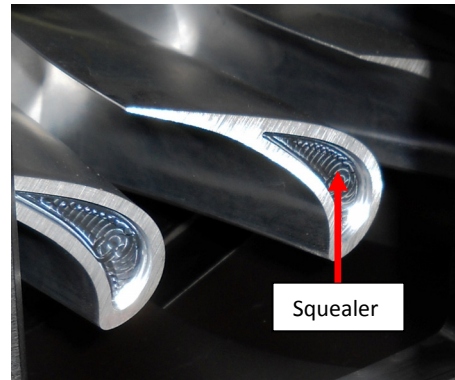


Abb. 1: Turbinenrotorschaukeln mit Squealer (Vertiefung an der Schaukelspitze).

Stand der Technik

Die zwei großen Herausforderungen einer aufgrund ihrer Rückwirkungsfreiheit prädestinierten optischen Messtechnik sind bei Spaltströmungsmessungen:

- a) eine hohe Zeitauflösung von $\leq 10 \mu\text{s}$, um während der Rotation mit einer Schaukel-durchtrittsfrequenz von ca. 1 kHz das Strömungsverhalten zeitlich (und örtlich) hinreichend auflösen zu können,
- b) eine hinreichende Robustheit bezüglich störender Reflexe, die bei der geringen Spalttiefe von typ. 1 mm stets auftreten.

PIV erfüllt als bildgebendes Verfahren die Anforderung an die Zeitauflösung, jedoch haben Lichtreflexe und die Krümmung des Gehäuses bislang nur bedingt Spaltströmungsmessungen zugelassen. Beispielsweise setzte Wernet 2005 am Rotor eines Axialverdichters (ohne Squealer) PIV ein, aber die Messebenen waren unterhalb der radialen Position des Spaltes. Hingegen gelangen Voges et al. 2011 erste PIV-Spaltströmungsmessungen an einem Axialverdichter (mit Casing Treatment, ohne Squealer), jedoch mit Ausnahme der Strömung unmittelbar zwischen der Rotorschaukelspitze und dem Gehäuse. PIV-Strömungsmessung an Turbinenrotoren im Schaukelspitzenbereich haben Kegalj et al. 2009 (ohne Squealer) und 2012 (mit Squealer) präsentiert, jedoch wiederum unterhalb der radialen Position des Spaltes. Somit fehlen bislang Messdaten zu der Spaltströmung bei Turbinenrotoren insbesondere für Rotorschaukeln mit Squealer.

Ziel der Arbeit und Gliederung

Im vorliegenden Beitrag wird deshalb ein alternativer messtechnischer Zugang für die Untersuchung von Spaltströmungen beschrieben und über dessen erfolgreiche Anwendung an einem Turbinenversuchsstand mit einem Turbinenrotor mit Squealer berichtet. Hierbei soll die Doppler-Global-Velozimetrie mit Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) zum Einsatz kommen, die von Fischer et al. 2007 vorgestellt wurde und sowohl ein hinreichend hohe Zeitauf-

lösung von 10 μs als auch das Potenzial einer wandnahen Messung bis 100 μm Wandabstand besitzt, siehe Fischer et al. 2009a und 2011. Zudem wurde von Fischer et al. 2012 über eine erste FM-DGV-Spaltströmungsmessung in einem Kaskadenwindkanal an Verdichterschaukeln berichtet.

Zunächst werden der Aufbau des Messsystems am Versuchsstand sowie das Messobjekt beschrieben. Danach wird kurz auf die Strömungssimulation eingegangen, mit der das gemessene Strömungsfeld verglichen werden soll. Abschließend werden die Mess- und Simulationsergebnisse vorgestellt, eingehend diskutiert und miteinander verglichen.

Messaufbau

Die Messungen fanden am 1½-stufigen (Stator-Rotor-Stator) Turbinenversuchsstand der Technischen Universität Darmstadt statt. Die Statoren bestehen aus jeweils 30 Leitschaufeln. Der Rotor besitzt 45 Schaufeln, die mit einem Squealer ausgestattet sind. Der Durchmesser der Turbine beträgt 881 mm. Die Rotorscheaufeln sind 101 mm lang (radiale Ausdehnung) und die Spalttiefe beträgt nur 900 μm . Die axiale Ausdehnung der Rotorscheaufel ist 50 mm und der Abstand zwischen zwei Schaufeln entlang des Umfangs beträgt 123 mm. Das gewünschte Messfeld umspannt somit 50 x 123 mm^2 . Die Turbine wird im Auslegungspunkt betrieben, d. h. bei einer Rotationsfrequenz von 1240 min^{-1} und einer Anströmgeschwindigkeit von 19,3 m/s. Der Luftmassenstrom beträgt 6,2 kg, die Lufttemperatur im Einlauf 308 K. Mehr Details zum Versuchsstand finden sich in Fischer et al. 2013.

Der Messaufbau ist in der Abb. 2 skizziert. Zudem ist ein Foto der Messanordnung in der Abb. 3 zu finden. Mit einem fasergekoppelten Endoskop wird Laserlicht (895 nm, ca. 0,5 W) in die Turbine eingeführt. Zur Beleuchtung des Messvolumens zwischen Rotorscheaufelspitze und Gehäuse wird anstatt eines typischerweise verwendeten Laserlichtschnitts ein Laserstrahl mit minimiertem Durchmesser verwendet, der den Spalt axial mittig passiert. Damit sollen die auftretenden Reflexe minimiert werden. Der Strahldurchmesser beträgt im Mittel ca. 500 μm . Das Laserlicht wird an Seedingpartikeln (DEHS, Durchmesser 1 μm) gestreut und das Partikelstreulicht seitwärts durch ein Glasfenster (100 mm x 70 mm x 15 mm) detektiert. Die Krümmung des Glasfensters ist der Krümmung des Turbinengehäuses angepasst.

Mit der Frequenzmodulations-Doppler-Global-Velozimetrie (FM-DGV) wird nun die Geschwindigkeit axial entlang des Laserstrahls an 23 Punkten simultan mit einer Messrate von 100 kHz während der Rotation des Rotors gemessen wird. Demnach wird die Strömung aufgrund der Rotation auch entlang des Umfangs gemessen, wenn man den gewünschten Bezug zur Stellung des Rotors herstellt. Letztlich ermöglicht die geforderte, hohe Zeitauflösung des FM-DGV-Messsystems von 10 μs diese Bildgebung.

Bei der Rotornendrehzahl beträgt die Schaufeldurchtrittsfrequenz 930 Hz. Folglich werden mit Messrate von 100 kHz in Umfangsrichtung 108 Pixel pro Schaufel aufgelöst. Um die axiale Ausdehnung der Schaufel komplett zu erfassen, wird nacheinander an zwei axialen Positionen gemessen, so dass in axialer Richtung letztlich 43 Pixel zur Verfügung stehen.

Schließlich erfolgt nacheinander eine Detektion aus drei verschiedenen Beobachtungsrichtungen \vec{o}_1 , \vec{o}_2 , \vec{o}_3 , um alle drei Geschwindigkeitskomponenten der Spaltströmung zu messen. Näheres zum FM-DGV-Messprinzip und seinen Eigenschaften ist beispielsweise in Fischer et al. 2009b und 2012 beschrieben.

Hervorzuheben ist die komplett fasergekoppelte Lichtzufuhr und -detektion, vgl. Abb. 3. Damit liegt (mit Ausnahme der Temperaturregelung der Absorptionszelle) ein passiver, flexibel einsetzbarer Messkopf vor, der sich für die Messungen am Turbinenversuchsstand als hinreichend robust bezüglich Vibrationen, Temperaturschwankungen und Verschmutzungen erwiesen hat.

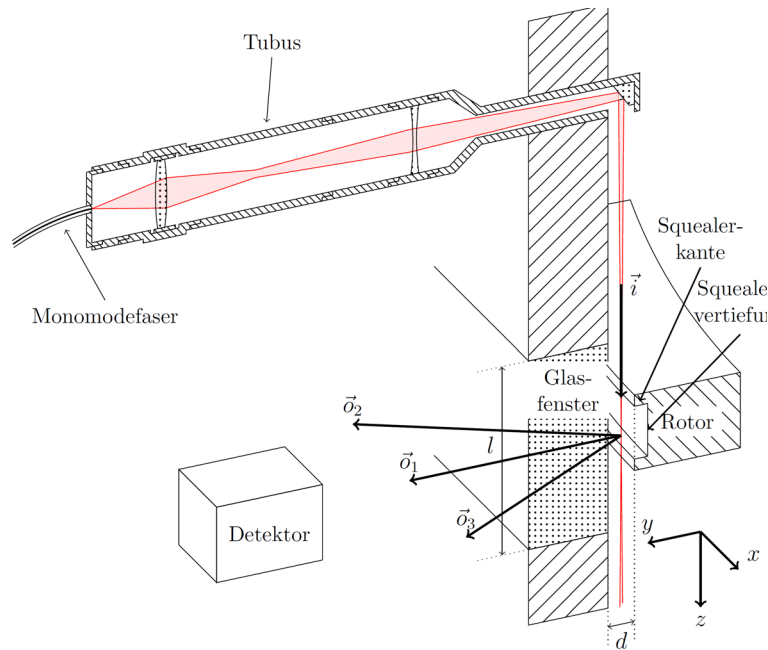


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messanordnung, wobei \vec{i} die Lasereinfallsrichtung und $\vec{o}_1, \vec{o}_2, \vec{o}_3$ die drei Beobachtungsrichtungen ($0^\circ, -35^\circ, +35^\circ$) angeben. Die Spalttiefe d beträgt $900 \mu\text{m}$.

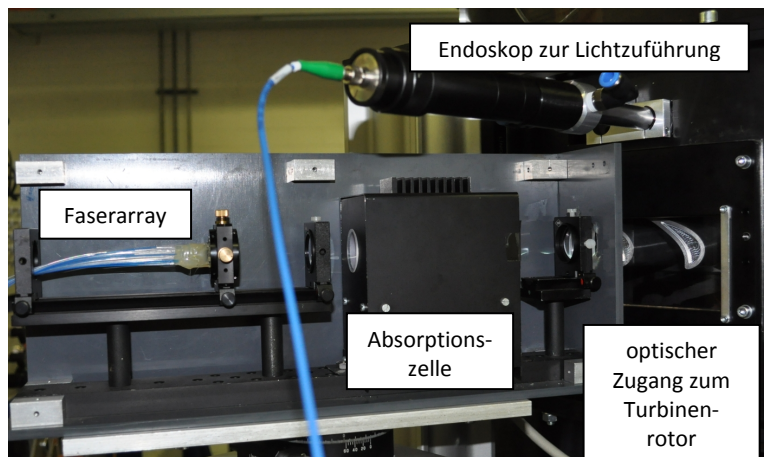


Abb. 3: Foto der Messanordnung für die Spaltströmungsmessung mit FM-DGV.

Simulation

Begleitend zum Experiment wurden auch numerische Berechnungen der Spaltströmung vorgenommen, um Simulation und Experiment wechselseitig zu stützen. Genutzt wurde die kommerzielle Software FINE/TURBO von NUMECA, wobei eine transiente Rechnung zum Einsatz kam. Das Rotormodell umfasst zwei Stator- und drei Rotorpassagen. Ein Schaufelabstand wird durch 30 Zeitschritte aufgelöst, so dass 90 Zeitschritte für eine Periode genutzt werden. Insgesamt umfasst das Rechengitter 10^7 Punkte.

Als Fluid wird Luft angesetzt, wobei die spezifische Wärmekapazität und der Isentropenexponent als konstant angenommen werden. Als Turbulenzmodell wird das Eingleichungsmodell von Spalart und Almaras 1992 genutzt. Die Einstromungsbedingungen sind anhand einer radialen Verteilung der axialen Geschwindigkeit und dem Massenstrom vorgegeben, die sich mittels Drucksonden bestimmen lassen. An der Ausströmung wird ein statisches Druckfeld vorgegeben. Sämtliche Oberflächen von Schaufeln und Gehäuse seien adiabatisch. Die Randflächen von jeder Passage in Umfangsrichtung werden periodisch wiederkehrend modelliert.

Ergebnisse

Die nachfolgend präsentierten Messbilder ergeben sich nach der Mittelung über 164 Schau-
felpassagen, wobei von 82 aufgezeichneten Umdrehungen nur die Messwerte von 2 Schau-
felpassagen genutzt wurden, weil dort die Schaufeln eloxiert waren.

Tangentiale Geschwindigkeit v_t :

Die gemessene und berechnete tangentielle Geschwindigkeitskomponente ist in der Abb. 4a
bzw. 4b dargestellt. Auffallend ist zunächst das Fehlen von Messwerten speziell an den
Squealerkanten. Hier traten starke Reflexionen auf, weshalb die Messwerte auf Basis einer
Schwellwertauswertung verworfen worden sind. Auch abseits der Squealerkante traten Re-
flexionen auf, die vermutlich auf Mehrfachreflexionen in der Maschine zurückzuführen sind
und bei allen drei Beobachtungsrichtungen auftraten. Entscheidend ist jedoch, dass die
Spaltströmung oberhalb des Squealers als auch in der Passage messbar war.

Qualitativ zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung von den Mess- und Simulationsergeb-
nissen. Die tangentielle Geschwindigkeit nimmt ausgehend von der Passage in Umfangsrich-
tung hin zur Druckseite (engl.: pressure side PS) zu. Die Simulationsergebnisse zeigen,
dass sie auf der Squealerkante an der unteren Druckseite maximal wird, über dem Squealer
ein lokales Minimum annimmt und hin zur auf der Saugseite (engl.: suction side SS) befindlichen
Squealerkante sich wieder beschleunigt. Danach verzögert sich die Einströmung in die Pas-
sage. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation der Spalt-
strömung über dem Squealer: Übereinstimmend fallen bei näherer Betrachtung zwei lokale
Minima auf, die auf eine dreidimensionale Strömung im Squealer hinweisen. Des Weiteren
findet sich übereinstimmend die Entwicklung des Spaltwirbels stromabwärts auf der Saugsei-
te der Schaufel. Schließlich wird auch die Vorzeichenumkehr der Strömungsgeschwindigkeit
von der Vorderkante zur Hinterkante richtig aufgelöst.

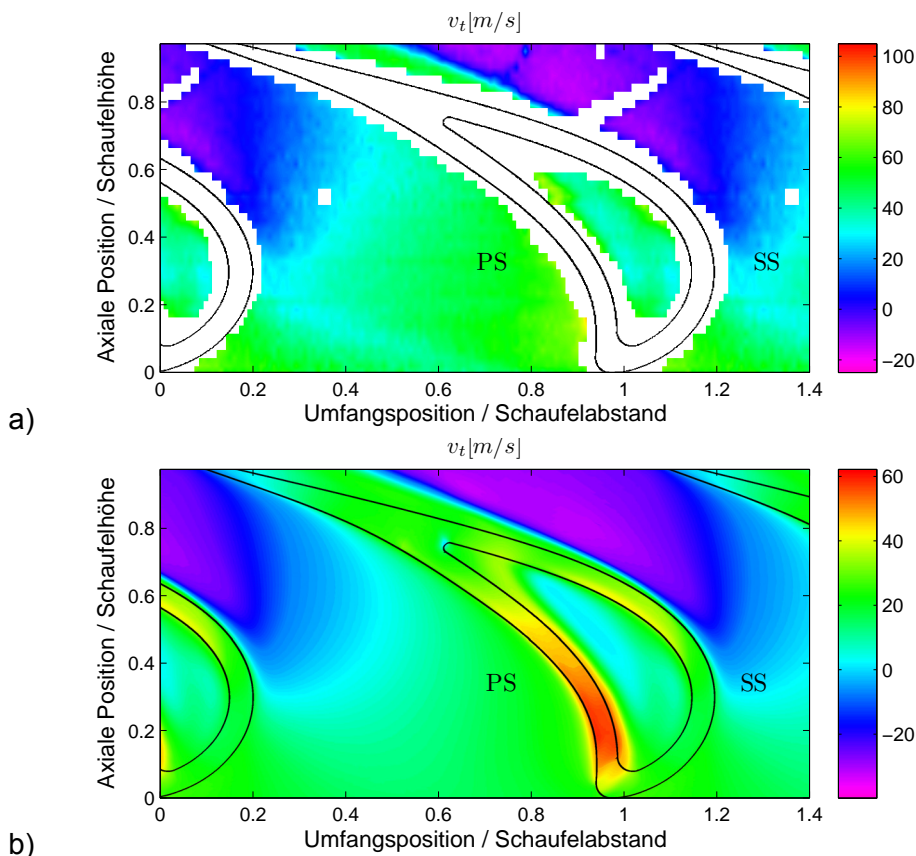


Abb. 4: a) Gemessene und b) berechnete tangentielle Geschwindigkeit v_t der Spaltströmung.

Radiale Geschwindigkeit v_r :

Für die radiale Komponente der Geschwindigkeit sind die Mess- und Rechenergebnisse in der Abb. 5a bzw. 5b dargestellt. Dabei fällt auf, dass das gemessene Strömungsbild deutlich verrauschter als bei der tangentialen Komponente ist. Der Grund hierfür ist eine geringere Empfindlichkeit bezüglich der radialen Komponente und folglich eine höhere Messunsicherheit, vgl. Fischer et al. 2013. Durch eine längere Messung lässt sich die Messunsicherheit dieser zufälligen Messabweichungen reduzieren. Zusätzlich treten im gemessenen Strömungsbild linienhafte Artefakte sowohl in der Passage auch in der Mitte des Squealerbereichs auf, die vermutlich wieder auf Reflexionen zurückzuführen sind. Zudem haben in der unteren Bildhälfte die gemessenen Werte an den Druckseiten der Squealerkanten ein anderes Vorzeichen als in der Strömungssimulation. Dies ist auf eine Dejustage der radialen Position des Laserstrahls und/oder auf zusätzliche Störungen durch Reflexionen zurückzuführen. Abgesehen davon findet man wieder eine qualitative Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation, wiewohl die absoluten Geschwindigkeitswerte beim Experiment tendenziell höher sind als bei der Simulation.

In der Passage ist die radiale Strömungsgeschwindigkeit nahezu null. Auf den Druckseiten der Squealerkante liegen positive und auf den Saugseiten negative Geschwindigkeitswerte vor. Demnach bewegt sich die Strömung zunächst radial hin zum Spalt und danach wieder weg, was gemäß der Umströmung der Schaufelspitze zu erwarten ist. Stromabwärts an der Saugseite der Schaufel ist wieder die Entwicklung des Spaltwirbels sichtbar, wobei lediglich negative Geschwindigkeiten zu erkennen sind. Folglich findet in der Messebene im Wesentlichen eine Abwärtsbewegung statt, was den Beginn bzw. die Entstehung des Spaltwirbels darstellt.

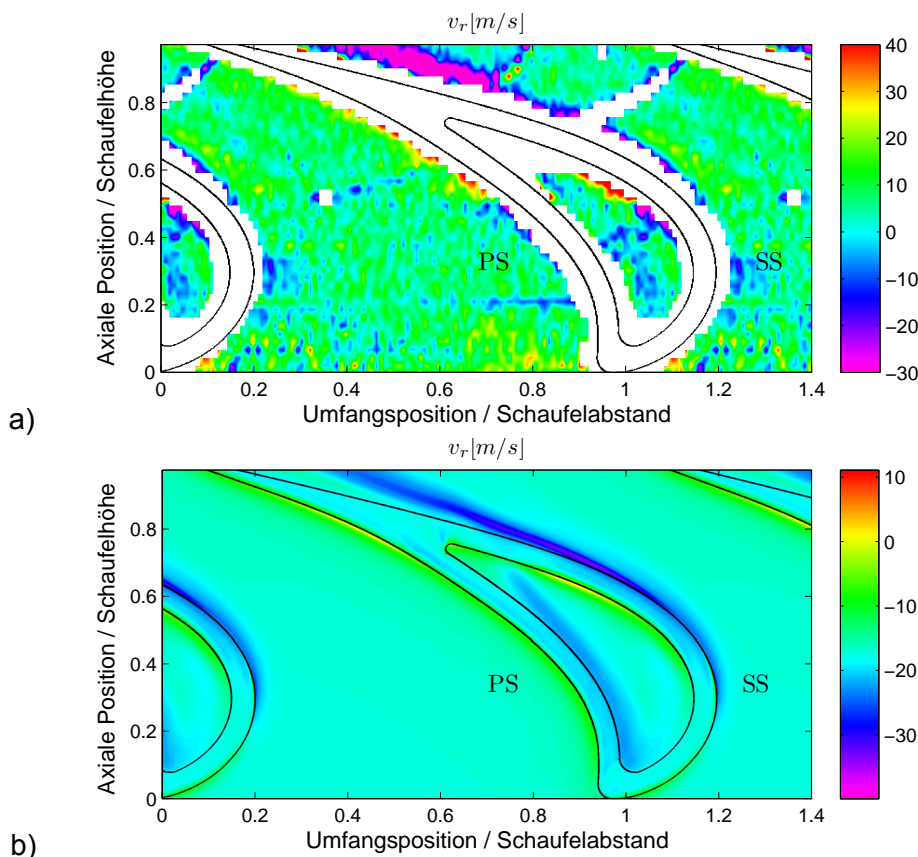


Abb. 5: a) Gemessene und b) berechnete radiale Geschwindigkeit v_r der Spaltströmung.

Axiale Geschwindigkeit v_a :

Die gemessene und berechnete axiale Komponente der Geschwindigkeit ist in der Abb. 6a bzw. 6b dargestellt. Bezüglich Störungen und Messunsicherheit gelten die gleichen Aussagen wie bei der radialen Geschwindigkeitskomponente. Im Mittel ergeben sich wieder sehr gute qualitative Überweinstimmungen zwischen dem gemessenen und dem berechneten Spaltströmungsverhalten. Beim Eintritt in die Passage ist die axiale Geschwindigkeit an der Druckseite kleiner als an der Saugseite, was sich am Austritt der Passage umkehrt. Hinzu kommt in der Passage der Spaltwirbel, dessen Ausprägung anhand der erhöhten Axialgeschwindigkeit stromabwärts auf der Saugseite klar ablesbar ist. Über dem Squealer gibt es eine komplexe Strömungsstruktur. Beispielsweise verschwindet vor der saugseitigen Squealerkante die Axialgeschwindigkeit bzw. nimmt dort ein lokales Minimum an.

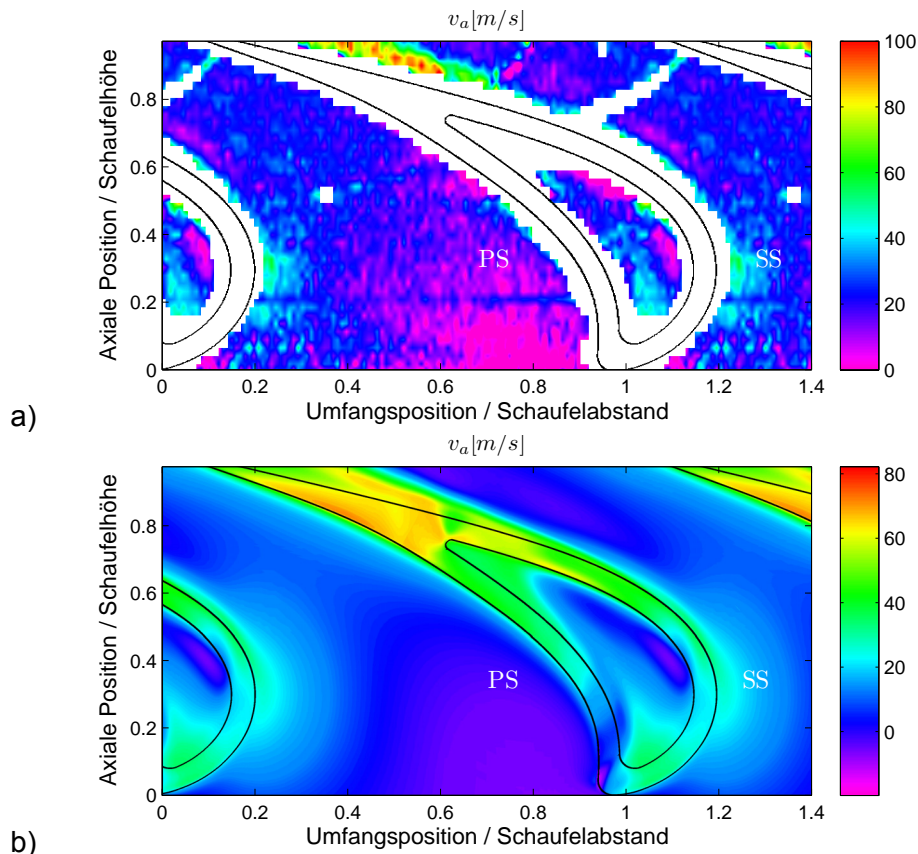


Abb. 6: a) Gemessene und b) berechnete axiale Geschwindigkeit v_a der Spaltströmung.

Zusammenfassung und Ausblick

An einem Turbinenversuchsstand wurde die Spaltströmung an einem Rotor mit Squealern während des Betriebs, d.h. im Auslegungspunkt bei einer Schaufeldurchtrittsfrequenz von 930 Hz mit einer Messrate von 100 kHz gemessen. Folglich ergaben sich 108 Pixel pro Schaufel in Umfangsrichtung. Die Mehrpunktmessung und eine Traversierung führte zu 43 Pixel in axialer Richtung. Die Ortsauflösung betrug ca. 1 mm (axial und tangential) bzw. 0,5 mm (radial). Es wurden alle drei Komponenten des Strömungsfeldes gemessen, analysiert und mit Strömungssimulationen abschließend verglichen. Die Messergebnisse des Experiments stimmen mit dem Simulationsergebnissen sehr gut überein. Die Spaltströmung oberhalb des Squealers weist Gradienten auf, die auf eine komplexe, dreidimensionale Strömung im Squealer hinweisen. Zudem konnte die Entstehung des Spaltwirbel auf der Saugseite des Rotors aufgelöst und lokalisiert werden. Damit ist gezeigt, dass das FM-DGV-Messverfahren für die Untersuchung von Spaltströmungen in rotierenden Maschinen geeignet ist und somit wichtige Beiträge zur Effizienzsteigerung von Turbomaschinen leisten kann.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts Cz55/22-1. Die Arbeiten entstanden zudem im Rahmen des Forschungsprogramms COORETEC, welches von der AG Turbo und dem Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert wird (Förderkennziffer 0327716V).

Darüber hinaus möchten wir Rolls-Royce Deutschland und Alstom für ihre Unterstützung und die freundliche Genehmigung zur Veröffentlichung danken. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Literatur

Ameri, A.A., Steinthorsson, E., Rigby, D.L.: "Effect of squealer tip on rotor heat transfer and efficiency" *Journal of Turbomachinery* 120(4): 753–759, 1998.

Denton, J.D.: "The 1993 IGTI scholar lecture: loss mechanisms in turbomachines", *Journal of Turbomachinery* 115(4):621–656, 1993.

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Grosche, G., Müller, H.: "Investigation of time-resolved single detector Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation", *Measurement Science Technology* 18:2529–2545, 2007.

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H.: "Measurements of velocity spectra using time-resolving Doppler global velocimetry with laser frequency modulation and a detector array", *Experiments in Fluids* 47:599–611, 2009a.

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H.: "Array Doppler global velocimeter with laser frequency modulation for turbulent flow analysis—sensor investigation and application", in: Nitsche, W., Dobriloff, C. (Hrsg.): *Imaging measurement methods for flow analysis*, Springer, Berlin, S. 31–41, 2009b.

Fischer, A., Haufe, D., Büttner, L., Czarske, J.: "Scattering effects at near-wall flow measurements using Doppler global velocimetry", *Applied Optics* 50(21):4068–4082, 2011.

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Gottschall, M., Mailach, R., Vogeler, K.: "Investigation of the tip clearance flow in a compressor cascade using a novel laser measurement technique with high temporal resolution", *Journal of Turbomachinery* 134(5):051004 (9 S.), 2012.

Fischer, A., König, J., Czarske, J., Rakenius, C., Schmid, G., Schiffer, H.-P.: "Investigation of the tip leakage flow at turbine rotor blades with squealer", *Experiments in Fluids* 54(2):1462 (15 S.), 2013.

Kegalj, M., Schiffer, H.-P.: "Endoscopic PIV measurements in a low pressure turbine rig", *Experiments in Fluids* 47:689–705, 2009.

Kegalj, M., Schmid, G., Wartzek, F., Schiffer, H.-P.: "Experimental and numerical investigation of tip leakage flow in a 1 1/2 stage turbine rig comparing flat and cavity-squealer tip geometries", *ASME TurboExpo*, GT2012-69568, 2012.

Padova, C., Dunn, M.G., Barton, J., Turner, K., Turner, A., DiTommaso, D.: "Casing treatment and blade-tip configuration effects on controlled gas turbine blade tip/shroud rubs at engine conditions", *Journal of Turbomachinery* 133(1):011016, 2011.

Palafox, P., Oldfield, M.L.G., Ireland, P.T., Jones, T.V., LaGraff, J.E.: "Blade tip heat transfer and aerodynamics in a large scale turbine cascade with moving endwall", *Journal of Turbomachinery* 134(2):021020, 2012.

Spalart, P.R., Allmaras, S.R.: "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", *AIAA 30th aerospace sciences meeting and exhibit*, Nr. AIAA-92-0439, Reno, Nevada, 1992.

Voges, M., Schnell, R., Willert, C., Mönig, R., Müller, M.W., Zscherp, C.: "Investigation of blade tip interaction with casing treatment in a transonic compressor—part I: particle image velocimetry", *Journal of Turbomachinery* 133:011007, 2011.

Wernet, M.P.: "Development of digital particle imaging velocimetry for use in turbomachinery", *Experiment in Fluids* 28:97–115, 2005.