

E.Göttlich, J.Woiseschläger, B.Hampel, H.Jericha, H.Heitmeir (2004) *Experimentelle Untersuchung instationärer Effekte in einer transsonischen Turbinenstufe / Experimental investigations of unsteady effects in transonic turbines*, in "Stationäre Gasturbinen: Fortschritte und Betriebserfahrungen", VDI-Bericht 1857, pp 109-118

Experimentelle Untersuchung instationärer Effekte in einer transsonischen Turbinenstufe

Experimental Investigation of Unsteady Effects in a Transonic Turbine Stage

E. Göttlich, J. Woisetschläger, B. Hampel, H. Jericha, F. Heitmeir

Kurzfassung

Die aktuelle Arbeit beschreibt die instationäre Strömung durch eine hoch belastete transsonische Gasturbinenstufe, die kontinuierlich im Turbinenprüfstand der Technischen Universität Graz betrieben wird. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Zweikomponenten-Laser-Doppler-Anemometer (LDA) und einem stereoskopischen Particle-Image-Velocimeter (3D-PIV) zur Erfassung der räumlichen Strömung, sowie einem schnellen Laser-Interferometer (LI) zur Vermessung der Dichteschwankungen durchgeführt. Die so gewonnenen Daten wurden zur zeitlich aufgelösten Visualisierung der bei 40 kHz stattfindenden Wirbelablösung von Stator- und Rotorhinterkanten verwendet. In beiden Wirbelstrassen stellt sich der Ablösevorgang auf eine höhere Harmonische der Schaufelfrequenz ein (phase locking). Die Ergebnisse werden anhand einer instationären, räumlichen Navier-Stokes Lösung des Strömungsfeldes diskutiert.

Abstract

This work presents the unsteady flow through a transonic turbine stage continuously operated at Graz University of Technology. A two-component Laser-Doppler-Anemometer (LDA) and a stereoscopic Particle-Image-Velocimetry (3D-PIV), both for velocity measurements, as well as a fast-response Laser-Interferometer (LI) for the recording of density fluctuation spectra were used. The data were used to visualize the 40 kHz vortex shedding at the trailing edge of stator and rotor blades. In these vortex streets the shedding frequency is linked to a higher harmonic of the blade passing frequency (phase locking). The results are discussed in comparison to a unsteady, three-dimensional Navier-Stokes simulation.

1. Einleitung

Die Erhöhung der Effizienz moderner Kraftwerke zur Erzeugung elektrischer Energie ist eine Möglichkeit die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren. Während Mitte des 20. Jahrhunderts die Effizienz bei der Gewinnung elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen bei weniger als 40% lag, stieg diese bis heute auf 60% an. Zusätzlich benutzen Kraftwerke mit Kraft-Wärmekopplung die Restwärme für Heizungszwecke und ermöglichen Kraftwerks-Gesamtwirkungsgrade von mehr als 90%, große Ersparnis an Brennstoff und Umweltbelastung wurden dadurch möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist die Umstellung der Kraftwerke auf Gas anstelle von Kohle, da bei Gas lediglich 370 kg CO₂ je MW erzeugter Leistung freigesetzt wird, wogegen bei Kohle dieser Wert bei 870 kg/MW liegt. Durch die Innovation des kombinierten Gas-Dampf-Prozesses wurde diese Entwicklung in Österreich frühzeitig gefördert (combined cycle plant CCP – GUD-Kraftwerk, erste Großanlage Korneuburg A, 75 MW, 1960, Welt-Wirkungsgrad-Rekord, Korneuburg B, 125 MW, 1981). Dies hat zu einer weltweit positiven Entwicklung geführt, leider ist aber in bevölkerungsreichen Regionen (China, Indien) Gas nicht in ausreichender Menge vorhanden.

Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden vorgeschlagen, um CO₂ aus dem Abgas auszuscheiden oder den Brennstoff gleich vor der Verbrennung in ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff umzuwandeln [1, 2]. Ein neuartiger Aspekt bei dieser Technologie ist neben der Kohlendioxidrückhaltung aus dem Abgas die mögliche Feuerung der Gasturbinen mit Wasserstoff, wobei diese aber bei der Brennstoffherstellung erfolgen muss.

Die Konzentration des CO₂ im Abgas kann durch direkte Verbrennung des fossilen Brennstoffs mit Sauerstoff anstelle von Luft erhöht werden. In diesem Kraftwerkskreisprozess würde das Arbeitsmedium lediglich aus Dampf (aus dem Verbrennungswasser) und CO₂ bestehen, wobei während des Betriebes einer solchen Anlage CO₂ und Wasser in genau jener Menge entnommen werden, in welcher diese bei der Verbrennung entstehen. Dieser erstmals 1985 von H. Jericha an der Technischen Universität Graz vorgestellte Kreisprozess wird in der internationalen Literatur als „Graz-Cycle“ geführt [3, 4]. Da durch die direkte Verbrennung mit Sauerstoff sehr hohe Temperaturen entstehen und durch die Verwendung von CO₂ und Dampf ein anderes Arbeitsmedium als in konventionellen Turbinen zum Einsatz kommt, werden an die im Graz Cycle verwendeten Stufen besondere Herausforderungen gestellt. Hohe Drehzahlen, Überschallströmungen, hohe Temperaturen und eine Vielzahl von instationären Effekten zeichnen diese Maschinen aus, und können nur durch Forschung und konstruktive Entwicklung beherrscht werden.

2. Versucheinrichtungen

Am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der Technischen Universität Graz stehen spezielle Prüfstände zur Verfügung, die eine Untersuchung moderner Turbinenstufen und deren Beschauflung erlauben. Ziel dieser Untersuchungen ist die Erstellung realer Datenbanken, um in weiterer Folge numerische Algorithmen zu entwickeln und zu validieren. Diese so validierten Simulationswerkzeuge stellen ein wertvolles Hilfsmittel für den Konstrukteur solcher Maschinen dar.

Im zweiten Kellergeschoss des Institutes versorgt eine Verdichterstation (mit maximal 3 MW elektrischer Leistungsaufnahme) die einzelnen Prüfstände. Dies ist ein Turbinenschaufelprüfstand in einem feuerfesten Labor im ersten Kellergeschoss und eine Überschallversuchsturbine in der Laborhalle des Erdgeschosses. In der rauen Umgebung von Überschallströmung und schnell rotierenden Turbinenschaufeln kommt es zu einem hohen Verschleiß an Messsonden sowie zu Fehlanströmungen derselben. Aus diesem Grund werden verstärkt laseroptische Systeme zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit herangezogen. Hierzu wird durch spezielle Sichtfenster optischer Zugang gewährt [5].

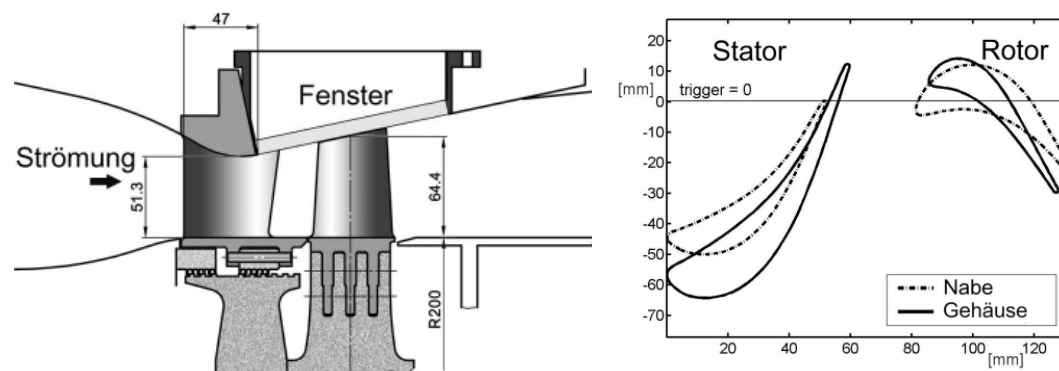


Bild 1: Transsonische Turbinenstufe (24 Leit-, 36 Laufschaufeln). Alle Abmessungen in mm.

Tabelle 1: Betriebspunkt während der Untersuchung

Sehnenlänge (Leitschaufel, Mitte) [mm]	78.9
Axiale Sehnenlänge (Leitschaufel, Mitte) [mm]	56.1
Umlenkwinkel Leitschaufel [°]	70
Sehnenlänge (Laufschaufel, Mitte) [mm]	55.9
Axiale Sehnenlänge (Laufschaufel, Mitte) [mm]	46.8
Umlenkwinkel Laufschaufel [°]	107
Austrittshöhe Leitschaufel [mm]	55.1
Austrittshöhe Laufschaufel [mm]	69.2
Rotorspalt [% Schaufelhöhe]	1.4
Leitschaufel - Laufschaufelabstand [% axiale Leitschaufelsehnenlänge]	47
Druckverhältnis $p_{tot,in}/p_{stat,out}$	3.7
Drehzahl [Upm]	10600
Totaltemperatur, Zuströmung $T_{tot,in}$ [K]	396
Reynoldszahl Leitschaufelaustritt	$2.57 \cdot 10^6$
Reynoldszahl Laufschaufelaustritt	$1.69 \cdot 10^6$

Bild 1 zeigt den Meridionalkanal und die Profile der untersuchten transsonische Turbinenstufe die bei einer maximalen Drehzahl von 11600 U/min (2,8 MW Wellenleistung, 22 kg/s Massenstrom) betrieben werden kann. Tabelle 1 zeigt die Geometrie- und Betriebsdaten für die hier vorgestellten Messungen. Diese Konstruktion lehnt sich bewusst an die Bedingungen großer stationärer Gasturbinen an.

3. Messtechnik

Neben konventioneller Messung von Druck und Temperatur an verschiedenen Stellen in der Strömung erfolgt mittels optischer Methoden eine berührungsfreie Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Insbesondere laseroptische Verfahren wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) und Particle-Image-Velocimetry (PIV) erlauben die Untersuchung instationärer Strömungseffekte in solchen hochbelasteten Turbinenstufen [6, 7, 8]. Eingesetzt wurde ein Zweikomponenten-LDA (DANTEC FiberFlow, Burst Spectrum Analyser) und ein stereoskopisches PIV System (DANTEC FlowMap 1500 mit zwei DANTEC HiSense Kameras zu je 1280x1024 Pixel sowie einem NewWave Double-Cavity Nd:YAG Laser mit 120 mJ Leistung pro Puls). Letzteres ermöglicht durch den Einsatz zweier Kameras die Erfassung der räumlichen Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in einer, durch einen Laserlichtschnitt vorgegebenen Ebene. Die Tracerpartikel wurden mittels Palas AGF 5.0D Seedinggenerator 0,5 m vor dem Stator eingebracht (DEHS Öltröpfchen) [8]. Während LDA und PIV die Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit in verschiedenen Punkten oder Ebenen ermöglichen, erlaubt der Einsatz schneller Laserinterferometer (LI, Polytec OVD 353, OFV-3001 Controller und OVD 02 Velocity Decoder) die Messung kleinster Dichteschwankungen in der Strömung. Dadurch wird die Bildung des Verdichtungsstoßes und die Erfassung der Frequenzen der Wirbelablösungen bis zu Frequenzen von etwa 100 kHz in situ ermöglicht [6, 9]. Bild 2 zeigt die Anordnung der einzelnen Messverfahren um die Turbinenstufe.

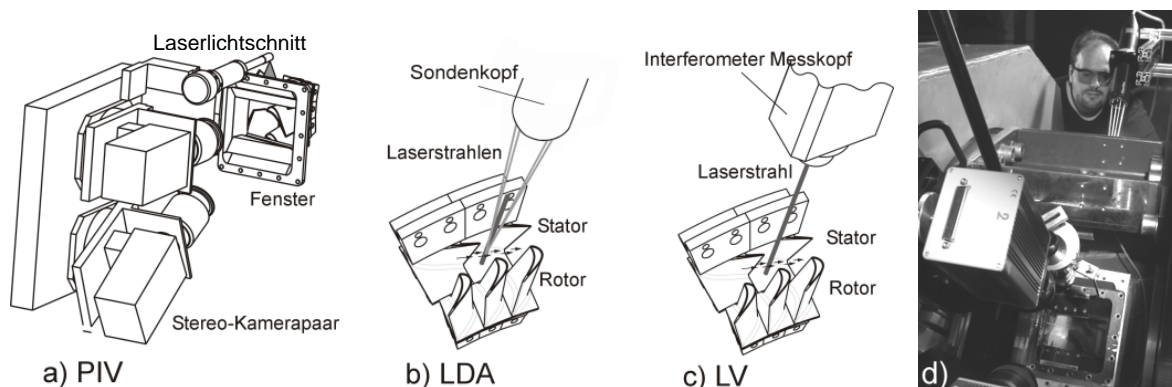


Bild 2: Anordnung der laser-optischen Messverfahren um die Turbinenstufe. **a)** stereoskopische Particle-Image-Velocimetry (PIV), **b)** Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) und **c)** Laser-Interferometrie (LI) und **d)** fotografische Aufnahme des Messaufbaus (im Vordergrund PIV, im Hintergrund LDA oder LI)

Konventionelle Strömungsmessung mittels Sonden wurde zur Erfassung des Betriebszustandes eingesetzt. Im Detail wurden die Totaltemperatur, der Totaldruck sowie der statische Druck in der Mischkammer, stromaufwärts des Stators, stromabwärts des Rotors und im stromabwärtsliegenden Diffusor ermittelt. Hierzu kam ein PSI 9016 Network-Scanner, National Instruments Fieldpoint-Module, sowie Thermoelemente und PMP Pressure-Scanner zum Einsatz. Die Datenerfassung erfolgte am PC mittels National Instruments LabVIEW-Software.

4. Experimentelle Ergebnisse

Mit Hilfe der PIV und der LDA ist es möglich, Strömungsvorgänge für verschiedene Stator-Rotor-Positionen winkelaufgelöst zu beobachten. Mit PIV vermessen und ausgewertet wurden Tangentialebenen am Mittelschnitt zwischen Laufrad und Leitrad, sowie in der Laufradabströmung, jeweils für sechs verschiedene Stator-Rotor-Positionen. Mit LDA wurden radiale Ebenen für insgesamt 40 verschiedene Stator-Rotor-Positionen untersucht. Für jede Stator-Rotor-Position konnte der Mittelwert über 180 momentane Geschwindigkeitsfelder (PIV), bzw. 2000 Momentanwerte der Geschwindigkeit pro Position (LDA) ermittelt werden.

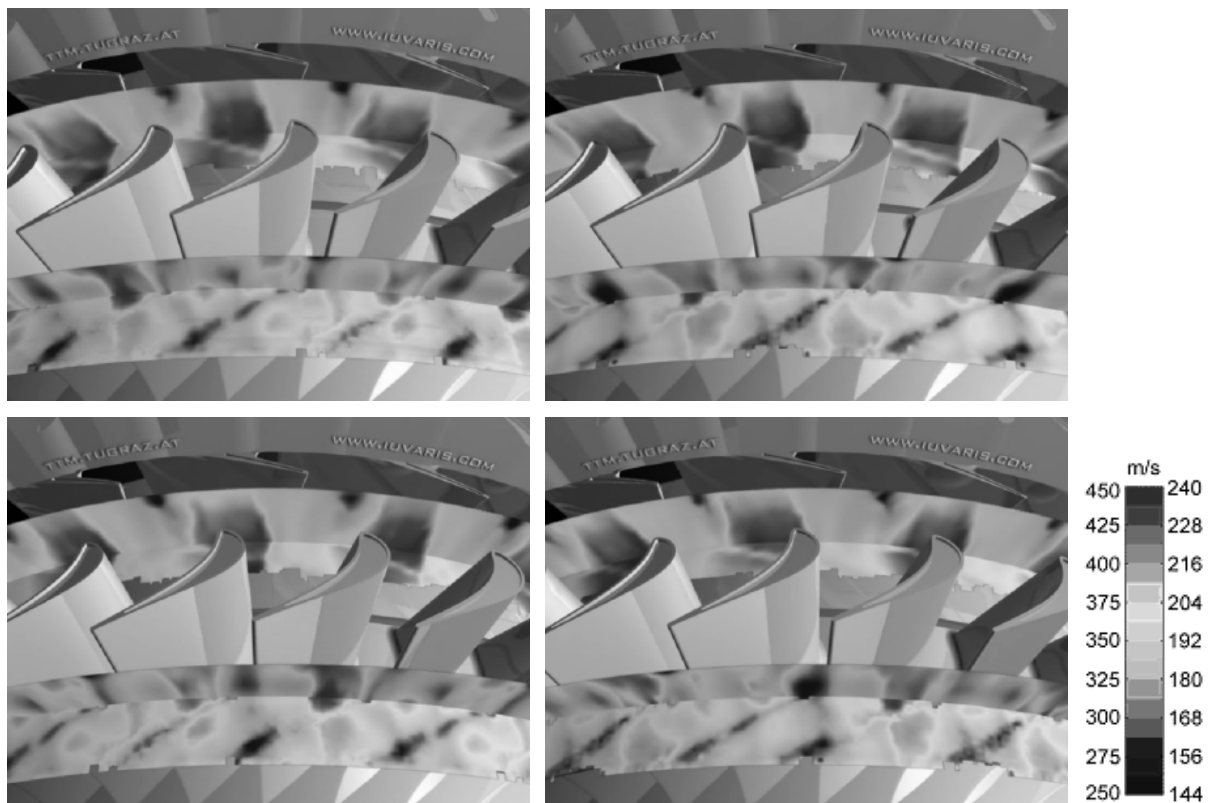


Bild 3: Gesamtgeschwindigkeiten zwischen Stator und Rotor, sowie in der Rotorabströmung für vier verschiedene Stator-Rotor-Positionen. Die Skalenwerte für den Stator-Rotor-Bereich sind jeweils links, jene für die Rotorabströmung rechts angeschrieben.

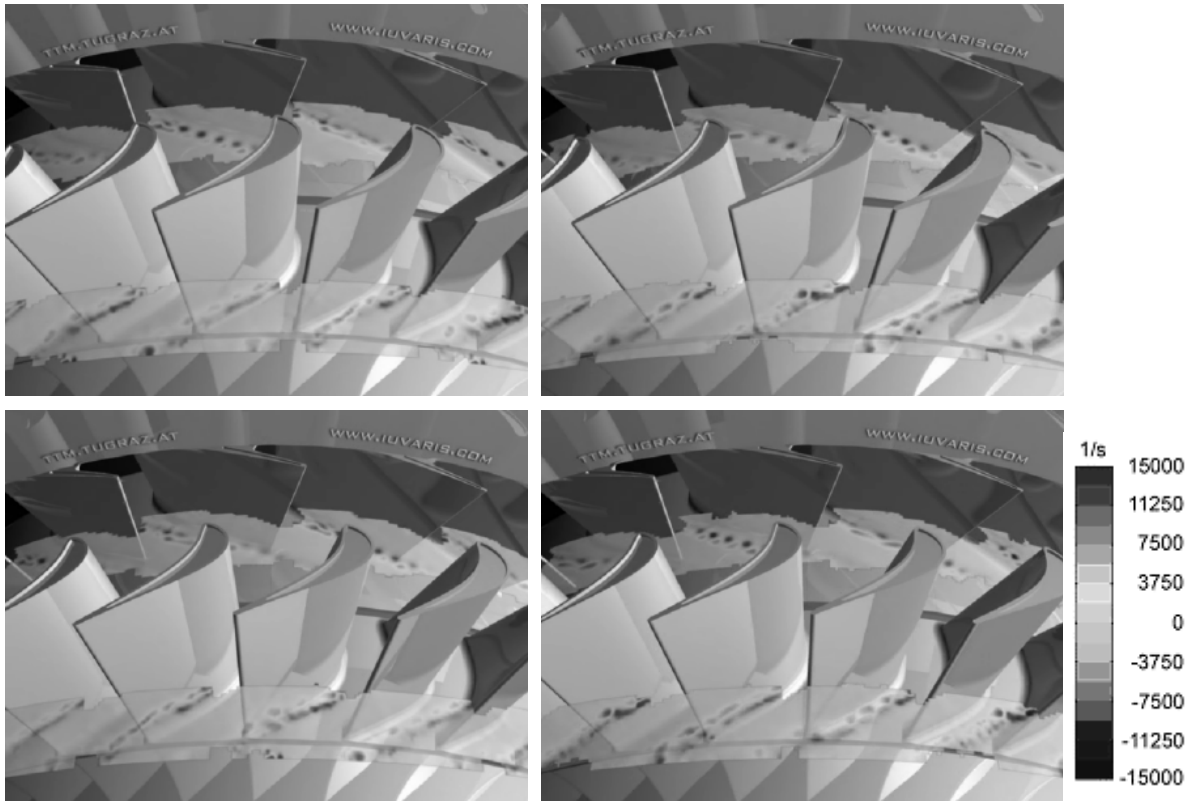


Bild 4: Mittels PIV ermittelte Wirbelstärke $\omega_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ in Kanalmitte der transsonischen Turbine.

Während die LDA-Messung die Bestimmung des Turbulenzgrades ermöglicht, erlaubt eine Untersuchung mittels PIV auch die Quantifizierung der Wirbelstärke in der Strömung mithilfe der Geschwindigkeitskomponenten in der Messebene und somit eine detaillierte Beobachtung der Wirbelstraße. In Bild 3 ist die Geschwindigkeit und in Bild 4 die Wirbelstärke zu verschiedenen Stator-Rotor-Positionen dargestellt. Die Wirbelstärke zeigt deutlich eine Korrelation zwischen der Ablösung der einzelnen Wirbel (bei etwa 44,6 kHz, das entspricht der siebenten Harmonischen der Schaufelfrequenz von 6360 Hz und einer Strouhalzahl von etwa 0,22) und der Stator-Rotor-Position. Würde bei gleicher Stator-Rotor-Position die Phase der Wirbelablösung für die Einzelmessungen jeweils andere Werte annehmen, wären in der gemittelten Aufnahme (wie in Bild 3 und 4) die sich ablösenden Wirbel nicht erkennbar.

Eine Erklärung dafür liefert die Messung mittels LI (Bild 5). Während bei subsonischer Durchströmung (linkes Diagramm in Bild 5) die Wirbelablösefrequenz bei etwa 40 kHz deutlich zu erkennen ist, dominieren bei transsonischer Durchströmung die Reflexionen des Verdichtungsstoßes das Strömungsfeld (rechtes Diagramm in Bild 5). Diese Reflexionen des Verdichtungsstoß sind im Frequenzspektrum deutlich als durch die Messposition laufende Rechteckstörung mit den entsprechenden höheren Harmonischen der Schaufelfrequenz zu erkennen. Die Wirbelablösung stellt sich nun auf die benachbarte siebente Harmonische ein.

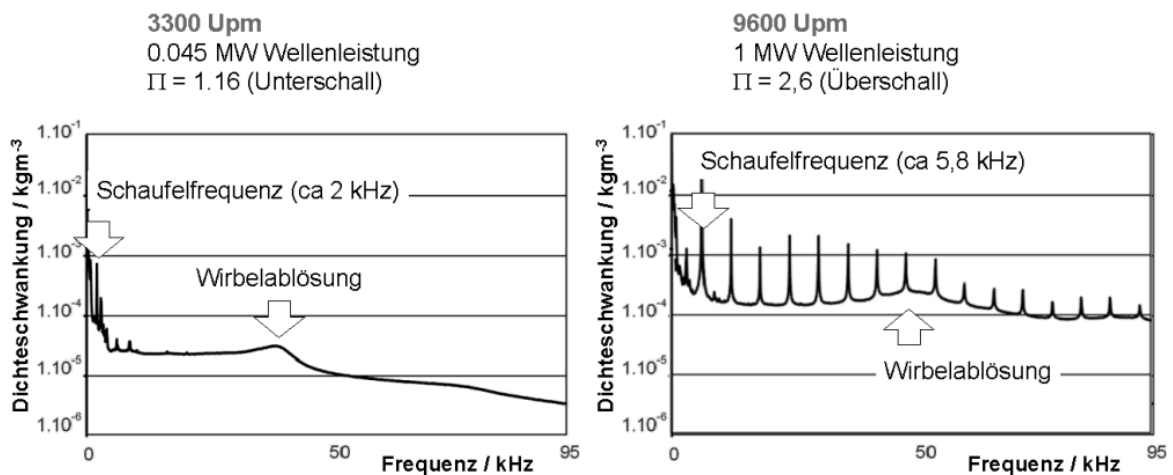


Bild 5: Frequenz aufgelöste Messung der Dichteschwankungen stromabwärts der Statorhinterkante mittels LI (vgl. Bild 2c). Links bei subsonischer Durchströmung der Turbinenstufe, rechts bei transsonischer Durchströmung.

Im hohen subsonischen Bereich beginnen die Dichteschwankungen im Strömungsfeld eine dominierende Rolle zu übernehmen. Es sei hier nochmals erwähnt, dass die Messung mit dem LI integral entlang des Laserstrahls über die Kanalhöhe stattfindet.

5. Vergleich mit der numerischen Simulation

Zur Verifikation des am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik entwickelten numerischen Codes und zum besseren Verständnis der Messdaten wurde eine erste numerische Simulation des Strömungsfeldes durchgeführt [10]. Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen werden hierbei mit einer zeititerativen Finite-Volumen-Methode gelöst, wobei die Turbulenz mit einem Eingleichungsmodell nach Spallart und Allmaras berücksichtigt wird. Die Lösung ist zeitaufgelöst und dreidimensional.

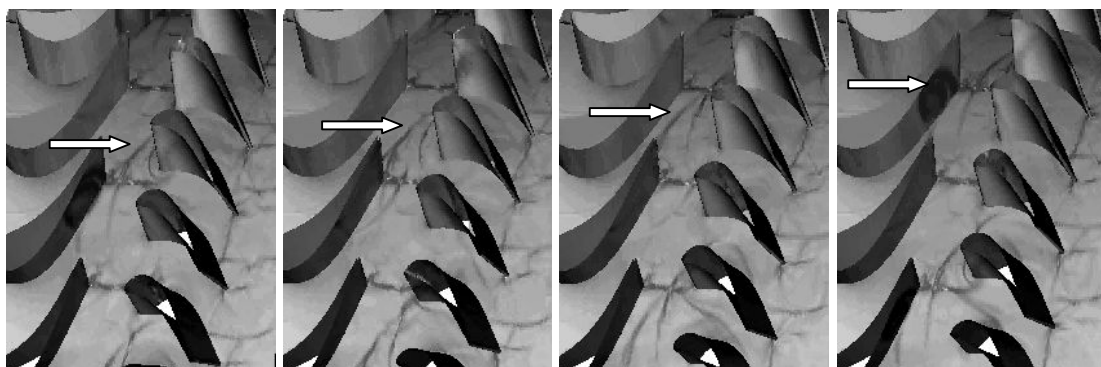


Bild 6. Reflexion des Verdichtungsstoßes an den vorbeilaufenden Rotorschaufeln in der numerischen Simulation des Ergebnisses (Darstellung des Druckgradienten am Mittelschnitt, Orte mit hohen Gradienten erscheinen in diesen Bildern als dunkle Bereiche)

Bild 6 zeigt das Ergebnis einer solchen numerischen Simulation. Dargestellt ist der Druckgradient in der Strömung in mittlerer Kanalhöhe. In der Leitschaufelabströmung ist die Reflexion des Verdichtungsstoßes an den vorbeiwandernden Laufschaufeln deutlich zu erkennen, ebenso die ausgeprägte Beeinflussung der saugseitigen Grenzschicht. Durch diesen „Schlag“ wird in weiterer Folge einmal pro Schaufelperiode eine Ablösung der Grenzschicht an der Schaufelhinterkante (Wirbelablösung im Nachlauf) getriggert.

Danksagung

Die Messungen sowie die Entwicklung der optischen Messtechnik für die Untersuchung moderner transsonischer Turbinen erfolgte im START-Programm Y-57 TEC des österreichischen Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung (FWF), der Aufbau der transsonischen Turbine am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der TU-Graz zuvor im Rahmen des Forschungsschwerpunktes S68 des FWF. Herrn Dipl.-Ing. Rene Pecnik sei für die Animation und die Darstellung der numerischen Ergebnisse in Bild 6 herzlich gedankt.

Literatur

- [1] K. Thambimuthu, J. Davidson und M. Gupta, 2002, "CO₂ Capture and Reuse", Proceedings of the IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, Regina, Canada 18-21 November 2002, published by the Energy research Centre of the Netherland, pp 31-52
- [2] J. Davison, P. Freund und A. Smith, 2001, "Putting Carbon Back Into the Ground", Report, IEA Greenhouse Gas R&D Program (www.ieagreen.org.uk), Cheltenham UK
- [3] H. Jericha, E. Göttlich, W. Sanz, und F. Heitmeir, 2003, "Design Optimization of the Graz Cycle Prototype Plant", Proc. ASME TURBO EXPO 2003, Atlanta, GA, paper GT2003-38120, (BEST PAPER AWARD) in print for ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, October 2004
- [4] H. Jericha, 1985, "Efficient Steam Cycle with Internal Combustion of Hydrogen and Stoichiometric Oxygen for Turbines and Piston Engines", CIMAC 1985, Oslo, und 1987 Int. J. Hydrogen Energy, Vol.12, No.5, pp 345-354
- [5] E. Göttlich, F. Neumayer, J. Woisetschläger, W. Sanz, F. Heitmeir, 2004, "Investigation of Stator-Rotor Interaction in a Transonic Turbine Stage Using Laser Doppler Velocimetry and Pneumatic Probes", Journal of Turbomachinery, Vol. 126, pp 297-305
- [6] J. Woisetschläger, N. Mayrhofer, B. Hampel, H. Lang und W. Sanz (2003) "Laser-Optical Investigation of Turbine Wake Flow", Exp. Fluids, Vol. 34, pp 371-378
- [7] J. Woisetschläger, H. Lang, B. Hampel, E. Göttlich und F. Heitmeir, 2003, "Influence of Blade Passing on the Stator Wake in a Transonic Turbine Stage Investigated by Particle Image Velocimetry and Laser Vibrometry", J Power & Energy, ImechE, Vol.217, pp 385-391
- [8] H. Lang, T. Mørck und J. Woisetschläger, 2002, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry in a Transonic Turbine Stage", Exp. Fluids, Vol. 32, pp 700-709
- [9] N. Mayrhofer, J. Woisetschläger, 2001, "Frequency Analysis of Turbulent Compressible Flows by Laser Vibrometry", Exp. Fluids, Vol. 31, pp 153-161
- [10] P. Pieringer, W. Sanz, F. Neumayer, A. Gehrler, F. Heitmeir, 2003, "Numerical Investigation of the Three-Dimensional Flow through a Transonic Turbine Stage", Proceedings of 5th European Conference on Turbomachinery, Eds. M.Št'astný, C.H. Sieverding, G.Bois, pp 1115-1131