

B.Hampel, N.Mayrhofer, J.Woisetschläger (2002) *Frequenzanalyse einer Turbinenschaufelgitterströmung mittels Laser-Vibrometer und holographischer Interferometrie*, Proc. GALA-Fachtagung *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, paper 32, Rostock, BRD, 2002

Frequenzanalyse einer Turbinenschaufelgitterströmung mittels Laser-Vibrometer und holographischer Interferometrie

B. Hampel, N. Mayrhofer, J. Woisetschläger

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik,
Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25A, A-8010 Graz, Österreich

Zusammenfassung

Die turbulenten Dichteschwankungen der Strömung durch eine Turbinenschaufelgitterkaskade wurden mittels zweier Laservibrometer gemessen und einer Frequenzanalyse unterzogen, sowie durch holographische Interferometrie (Zweireferenzstrahl-Phasenschiebverfahren) visualisiert. Die Versuche fanden bei einer isentropen Abströmmachzahl von $M_{2, is} = 0,76$ und einer Reynoldszahl von $1,1 \times 10^6$ statt. Die Sehnenlänge der Schaufeln betrug 58 mm. Anhand der gemessenen Frequenzverteilung im Schaufelkanal bzw. nahe der Schaufeloberfläche konnten typische Merkmale der Strömung, wie der Ort der Transition der Schaufelgrenzschicht, sowie die Ausbreitung von Druckwellen, verursacht durch die Strömungsablösung an der Schaufelhinterkante beobachtet werden.

Einleitung

Der Nachlauf von Turbinenschaufeln, im allgemeinen eine von Karman'sche Wirbelstraße, wechselwirkt mit der Strömung der nachfolgenden Schaufeln. Verhalten und Effizienz der Stufe werden durch die hervorgerufene Veränderung der Druckverteilung, der Grenzschichtbildung, sowie des Wärmeübergang massiv beeinflusst. Der entstehende Wirbel erhält Drehung von der sich ablösenden Scherschicht, bis er in den Bereich der gegenüberliegenden Grenzschicht mit entgegengesetzter Drehung eindringt [1], [2]. Enthält der Wirbel genügend Fluidmaterial, löst er sich von der Hinterkante ab. Die Ablösefrequenz sowie deren Stabilität hängt in hohem Maß vom Zustand der Grenzschichten ab. Verschieden dicke Grenzschichten an Saug- und Druckseite der Schaufel erzeugen eine asymmetrische Wirbelstraße und können zu instabiler, d.h. chaotischer Wirbelablösung führen [2], [3]. Da die numerische Simulation solcher Phänomene zeitaufgelöste Berechnungen erfordert, besteht großer Bedarf an vergleichbaren experimentellen Daten [4]-[6]. Zudem zeigte sich in letzter Zeit, dass die Wechselwirkung zwischen Hauptströmung und Grenzschicht nicht durch den Turbulenzgrad allein charakterisiert wird, da auch die Frequenzverteilung der Störungen großen Einfluss auf die Reaktion der Grenzschicht haben kann [7]. Die vorliegende Arbeit beschreibt den Einsatz von Laservibrometern, die - in der Schwingungsmessung etabliert - hier jedoch zur Erfassung von Dichteschwankungen verwendet werden [8].

Experimenteller Aufbau

Transsonischer Prüfstand

Die vorliegenden Untersuchungen wurden am transsonischen Prüfstand des Institutes durchgeführt. Die Druckluftversorgung erfolgte durch die hauseigene Verdichterstation, bestehend aus zwei Radialkompressoren und einem Schraubenverdichter, mit einer maximalen Gesamtleistung von 3 MW. Die Anlage kann, je nach gefordertem Massenstrom und Zuströmdruck, in 13 verschiedenen Fahrweisen betrieben werden. Mit Hilfe zweier

Kühler kann die Versuchstemperatur geregelt werden. Der Prüfstand besitzt eine runde Ausnehmung von 400 mm Durchmesser in der zylindrische Einsätze mit den zu untersuchenden Schaufelgittern montiert werden.

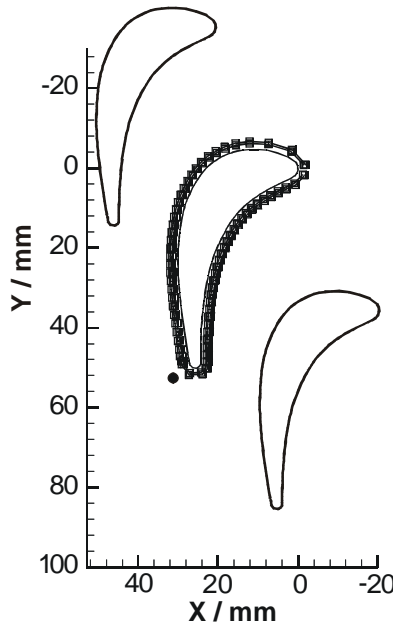


Abb. 1: Schaufelkaskade
 Quadrate: Messpositionen
 Abb5; Kreis: Messposition
 Abb. 4

Turbinenschaufelkaskade

Die vorliegenden Messungen erfolgten an den in Abb. 1 dargestellten Profilen mit der Bezeichnung VKI 1 [9] einer Turbinenschaufelgitterkaskade. Der Aufbau besitzt eine Zuströmung von 100 mm Breite und 230 mm Höhe. Ebene Glasfenster an den Seitenflächen des zylindrischen Einsatzes mit einer Dicke von 15 mm ermöglichten den optischen Zugang zur Mess- sowie den beiden benachbarten Schaufeln. Zur Überwachung der Strömungsparameter befanden sich in der Zuströmung je eine konventionelle Totaldruck- sowie eine Totaltemperatursonde und mehrere Druckmessbohrungen in der Seitenwand der Abströmung zur Messung des statischen Drucks.. Als Druckmessmodul fungierte ein ZOC14NP/16Px-50psid System mit 16 Kanälen. Dessen relative Genauigkeit beträgt 0.1 %.

Vibrometer

Grundlagen

Laser-Vibrometer, auch als Einpunkt-Vibrometer bezeichnet, werden üblicherweise zur punktweisen Messung von Oberflächenschwingungen fester Körper verwendet. Sie bestehen im Prinzip aus einem He-Ne Laser, dessen Strahl durch ein Mach-Zehnder Interferometer geführt wird (siehe Abb. 2). Der Messstrahl verlässt das Gerät und wird von der zu vermessenden

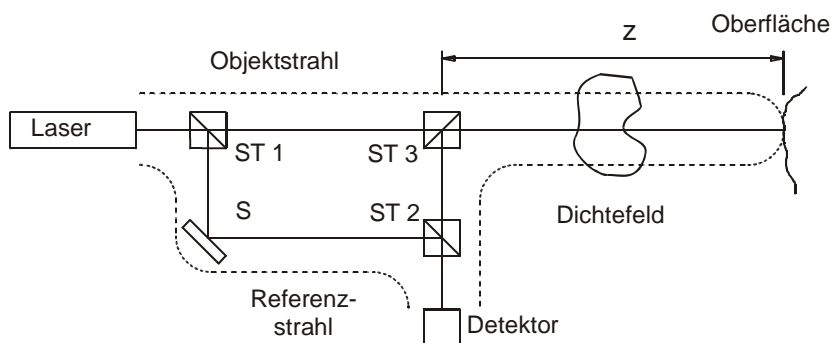


Abb. 2: Laservibrometer, Prinzip. S .. Spiegel; ST .. Strahlteiler

Oberfläche reflektiert. Ein Photodetektor registriert die Helligkeitsschwankungen der Interferenz zwischen Mess- und Referenzstrahl am Ausgang des Interferometers. Die Frequenz dieser Oszillationen wird mittels eines FM-Demodulators gemessen. Zur Bestimmung

der Bewegungsrichtung verschiebt ein akusto-optischer Modulator (AOM) die Frequenz des Messstrahls, wodurch bei ruhendem Objekt die Differenzfrequenz zwischen Mess- und Referenzstrahl am Ausgang des Interferometers als Schwebung anliegt. Eine Bewegung der Objektoberfläche verschiebt somit diese Trägerfrequenz und erlaubt dadurch die Bestimmung von Richtung und Betrag der Bewegung. Dieses Verfahren arbeitet im Falle der Schwingungsuntersuchung fester Oberflächen unter der Annahme konstanter Luftdichte entlang des Messstrahls.

Ruht andererseits die reflektierende Oberfläche, so misst das Vibrometer Dichteschwankungen entlang des Laserstrahls. Die Beziehung zwischen der Änderung der optischen Weglänge ΔOPL , der Lichtphase $\Delta\phi$ und dem Integral der Dichteänderungen $\Delta\rho$ ergibt sich unter Verwendung der Gladstone-Dale Konstante G und der Lichtwellenlänge λ zu [10]:

$$G \int_z \Delta\rho(t) dz = \Delta OPL(t) = \frac{\lambda\phi(t)}{4\pi} \quad (1)$$

Aufbau

Der Aufbau beinhaltet zwei Vibrometer des Typs POLYTECH OFV 353, das traversierte Signal-Vibrometer und das ortsfeste Referenz-Vibrometer. Da bei diesen Geräten der intern aufgeweitete Messstrahl durch ein Objektiv auf die reflektierende Oberfläche fokussiert wird und somit nur als konvergentes Strahlenbündel vorliegt, wurde der Laserstrahl durch eine Zerstreuungslinse von 40 mm Brennweite parallelisiert. Somit wurde ein konstanter, effektiver Strahldurchmesser von 0.5 – 1 mm erreicht.

Die Laserstrahlen beider Vibrometer liefen parallel zu den Schaufelhinterkanten durch die Strömung. Der Endspiegel des Signal-Vibrometers, besaß eine Abmessung von etwa 200 x 300 mm um den gesamten Traversierbereich abzudecken. Für den unter dem Messbereich geführten Strahl des Referenz-Vibrometers wurde ein kleiner Spiegel 10 x 10 mm verwendet. Die Traversierung des Signal-Vibrometers erfolgte mittels einer 'light weight traverse' der Firma DANTEC, welche durch ein am Institut entwickeltes LABVIEW-Messprogramm von einem PC aus automatisch angesteuert wurde. Die

Messpositionen richteten sich nach einem Rechenetz vorhergegangener CFD-Kalkulationen. Eine FFT-Analysekarte (NI4551) fourier-transformierte die Signale beider Vibrometer, wodurch die Amplitudenspektren sowie das Kreuzspektrum errechnet und gemittelt werden konnten. Das Kreuzspektrum erlaubte die Bestimmung der frequenz aufgelösten Phasendifferenzen zwischen den einzelnen Messpunkten.

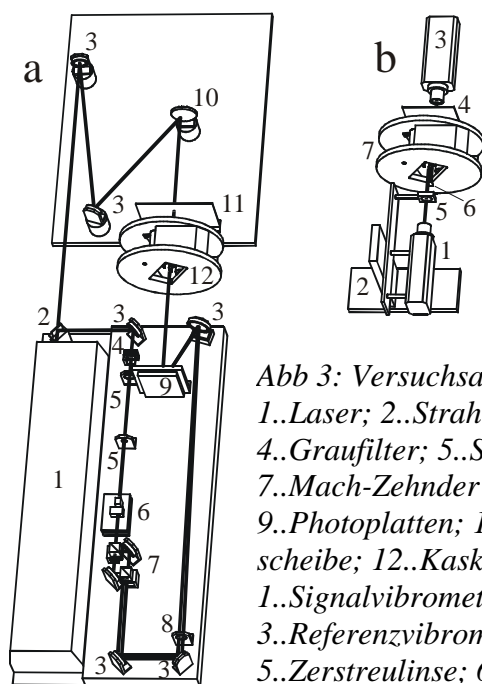


Abb 3: Versuchsaufbau a) Holographie:
 1..Laser; 2..Strahlteiler; 3..Spiegel;
 4..Graufilter; 5..Sammellinse; 6..AOM's;
 7..Mach-Zehnder Aufbau; 8..Zerstreuungslinse;
 9..Photoplatte; 10..Kugelspiegel; 11..Mattscheibe; 12..Kaskade; b) Vibrometer:
 1..Signalvibrometer; 2..Traversierung;
 3..Referenzvibrometer; 4..großer Spiegel;
 5..Zerstreuungslinse; 6..Spiegel; 7..Kaskade

Holographie

Der verwendete Zweireferenzstrahl-Phasenschiebeaufbau ist in Abb. 3 a dargestellt. Die Belichtung erfolgte durch einen Rubinlaser, welcher zwei Pulse mit definiertem zeitlichen

Abstand erzeugte. Diese bildeten die Strömung zum jeweiligen Zeitpunkt auf die holographischen Platten (AGFA8E75 bzw. 10E75 - Photoplatte) ab. Bei der Rekonstruktion überlagerten sich beide Hologramme und erzeugen ein holographisches Interferogramm dessen Streifenmuster den Isolinien des Phasen- bzw. des Dichteunterschieds zwischen beiden Zeitpunkten entspricht. Zur genauen Bestimmung der Phasen- und somit der Dichtedifferenz wurden die Laserpulse bei der Messung durch akusto-optische Modulatoren

(AOM's) verschieden stark abgelenkt und mittels eines Mach-Zehnder Aufbaus wieder refokussiert. Dadurch trafen die Referenzstrahlen unter einem Winkel von einigen mrad auf die Hologrammplatte. Diese Winkeltrennung ermöglichte eine Rekonstruktion, bei der jedem Hologramm ein separater Referenzstrahl zugeordnet werden konnte. Einer der Rekonstruktionstrahlen lief über einen, auf einem Piezokristall montierten Spiegel. Dadurch konnte dieser Strahlengang verlängert oder verkürzt werden und somit die Phase zwischen beiden Referenzstrahlen definiert eingestellt werden. Bei dem im vorliegenden Fall verwendeten Carré – Phasenschiebverfahren [11] wurden 4 Hologrammpaare verschiedener Phasendifferenz zwischen den Rekonstruktionstrahlen mittels CCD-Kamera aufgenommen. Aus den vier Intensitätswerten jedes Pixels kann mit diesem Verfahren die modulo- 2π -Phase des Sekundärhologramms punktweise bestimmt werden. Die Entfaltung des Phasenverlaufs erfolgt durch eine am Institut entwickelte MATLAB-Routine.

Ergebnisse und Diskussion

Strouhal-Spektren bei verschiedenen Reynoldszahlen

Die hier angeführten Messungen erfolgten in einem 'Punkt' nahe der Saugseite des Profils auf der Höhe der Hinterkante (siehe Abb. 1). Die Messposition lag nicht direkt im Nachlauf der Schaufel, jedoch zeigten Feldmessungen in verschiedenen Punkten, dass die dominanten Frequenzen der Wirbelablösung in einem weiten Bereich um die Hinterkante im Strömungsfeld identifizierbar waren. Es wurden 37 Strömungszustände mit verschiedenen Reynoldszahlen, respektive Machzahlen vermessen, um das Verhalten der Wirbelablösungsfrequenz in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit zu untersuchen. Als charakteristische Länge zur Berechnung der Reynoldszahl wurde die

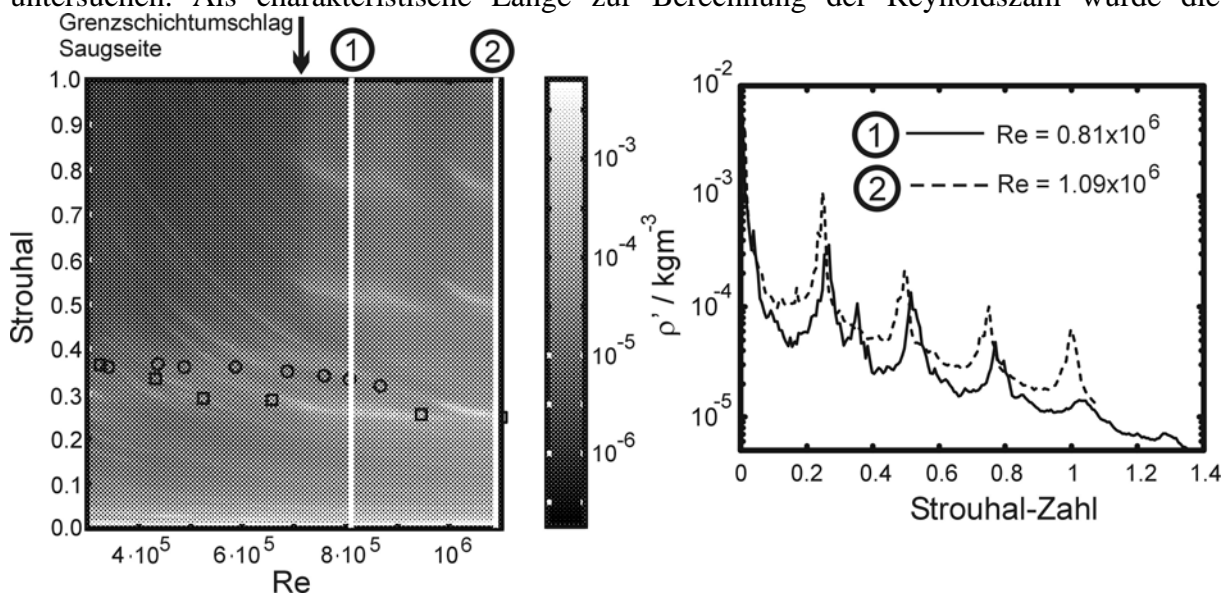


Abb. 4: Strouhal-Spektren bei verschiedenen Reynoldszahlen. Ergebnisse von [3]:

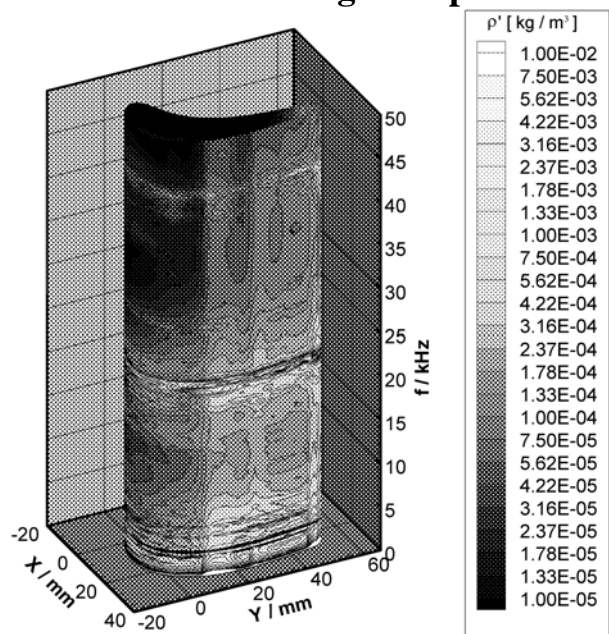
Kreise: runde Hinterkante; Rechtecke: rechteckige Hinterkante

Sehnenlänge herangezogen. Zum Vergleich mit Literaturdaten [3] erfolgte eine Umrechnung der gemessenen Frequenzen auf die Strouhalzahlen S , welche sich aus der isentropen Abströmungsgeschwindigkeit w , der gemessenen Frequenz f und der Hinterkantendicke $d = 2,9$ mm wie folgt errechnen:

$$S = \frac{fd}{w} \quad (2)$$

In einem Reynoldszahlbereich von unter 700000 trat keine definierte Ablösefrequenz auf, vielmehr konnten mehrere schwache Peaks identifiziert werden (Abb. 4). Bei einer Reynoldszahl von 700000 stieg der kontinuierliche Untergrund des Spektrums sprunghaft an, was auf beginnende Transition der saugseitigen Grenzschicht schließen lässt. Zudem tritt eine Ablösefrequenz ($S \approx 0.25$) sowie ihre Oberschwingungen klar hervor, begleitet von einem höheren Seitenband ($S \approx 0.35$). Dies deutet auf 'quasiperiodische' Ablösung hin, welche zwischen den beiden Hauptfrequenzen hin und her sprang. Ab einer Reynoldszahl von 10^6 trat nur noch eine Frequenz mit ihren Oberschwingungen auf. Es ist anzunehmen, dass ab diesem Wert beide Grenzschichten der Schaufel an der Hinterkante voll turbulent waren und dadurch die Wirbelablösung stabil wurde. Messungen von Sieverding und Heinemann [3] am vorliegenden Profil zeigten, dass bei rechteckiger Hinterkante, d.h. erzwungen vollturbulenter Wirbelbildung die Frequenz auf diesem niedrigeren Ast lag.

Räumliche Verteilung der Spektren und Visualisierung



Bei zwei verschiedenen Strömungszuständen wurde die räumliche Verteilung der Spektren entlang der Schaufeloberfläche vermessen (vgl. Abb. 1), wobei hier nur auf den Zustand höherer Reynoldszahl von 1.09×10^6 eingegangen werden soll. Die isentrope Abströmmachzahl $M_{2, is}$ betrug in diese Fall 0.76. Aufgetragen ist das Spektrum entlang der Schaufeloberfläche (siehe Abb. 5), wobei dieses zum Zwecke einer besseren Darstellung entsprechend dem Profil räumlich gekrümmt wurde. Deutlich erkennbar ist die Ablösefrequenz von 22 kHz, ebenso deren Ausbreitung über die gesamte Schaufeloberfläche sowie die 1. Oberschwingung bei 44 kHz. Der plötzliche Anstieg des kontinuierlichen Untergrundes im Spektrum bei etwa 40% der Saugseitenlänge deutet auf den

Abb. 5: Spektrum an der Schaufeloberfläche

Turbulenzumschlag der Grenzschicht hin. Die leichte Abnahme und ein erneuter Anstieg fast des gesamten Spektrums könnte ein Indiz für eine Ablöseblase sein, die durch Wechselwirkung mit der Nachbarschaufel entsteht.

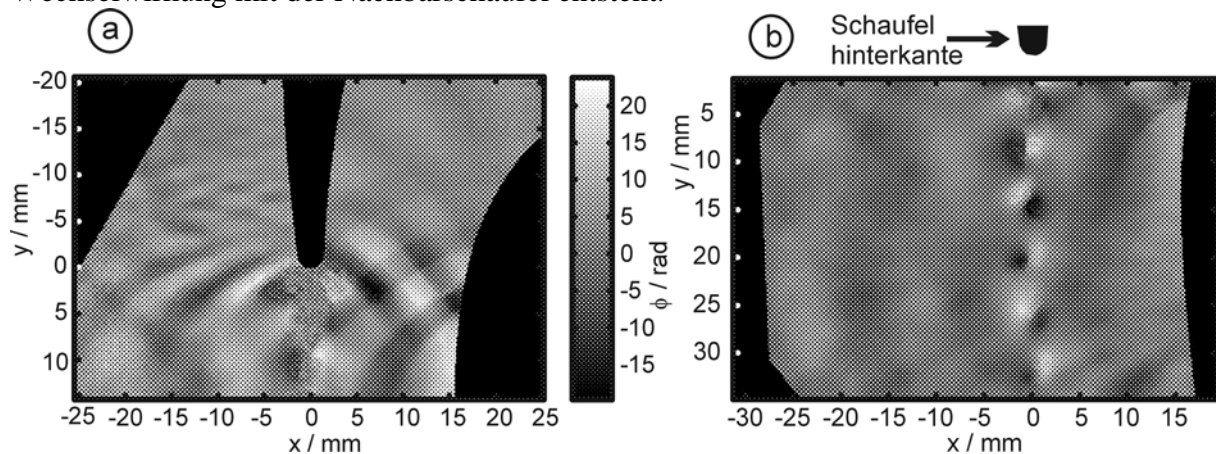


Abb. 6: Visualisierung der Dichteschwankungen. a) Schaufelhinterkante; b) Nachlauf

Eine mittels holographischer Interferometrie gewonnene 'Momentaufnahme' des Dichtefeldes ist in Abb. 6 zu sehen. Die Größe ϕ entspricht hier der Differenz zweier Dichtefelder, die zu entgegengesetzten Zeitpunkten des Wirbelablösezyklus aufgenommen wurden. Daher sind in Abb. 6b zwei Wirbelstraßen erkennbar, wobei jeweils alle 'dunklen', bzw. 'hellen' Wirbel einem Zeitpunkt zuzuordnen sind. Ein Vergleich von Abb. 6 a und 6 b zeigt, dass Wirbel und Druckwellen in etwa gleich starke Dichteänderungen des Strömungsfeldes hervorrufen. Ebenso sind die vom Nachlauf ausgehenden Druckwellen (Schallwellen) erkennbar, welche die besagte Ablöseblase verursachen dürften.

Danksagung

Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts START-Y57 'Nonintrusive Measurement of Turbulence in Turbomachinery' des FWF und des Bundesministeriums für Wissenschaft und Kunst durchgeführt.

Literatur

- [1] **Cicatelli G, Sieverding C. H.**, "A review of the research on unsteady turbine blade wake characteristics" AGARD PEP 85th Symposium on Loss Mechanisms and Unsteady Flows in Turbomachines, Derby, 8-12 Mai, 1995
- [2] **Cicatelli G, Sieverding C. H.**, "The effect of vortex shedding on the unsteady pressure distribution around the trailing edge of a turbine blade" ASME Journal of Turbomachinery, 119 (1997) pp. 810-19
- [3] **Sieverding C.H., Heinemann H.**, "The influence of boundary layer state on vortex shedding from flat plates and turbine cascades" ASME Journal of Turbomachinery 112 (1990) pp 181-7
- [4] **Currie T. C., Carscallen W. E.**, "Simulation of the trailing edge vortex shedding in a transonic turbine cascade" ASME Journal of Turbomachinery 120 (1998) pp 10-19
- [5] **Carscallen W. E. Currie T. C., Hogg S. I., Gostelov J.P.**, "Measurement and computation of energy separation in the vortical wake flow of a turbine nozzle cascade" ASME Journal of Turbomachinery 121 (1999) pp 703-8
- [6] **Gehrer A., Lang H., Mayrhofer N., Woisetschläger J.**, "Numerical and experimental investigation of trailing edge vortex shedding" ASME International Gas Turbine & Aeroengine Congress (2000) 2000-GT-434
- [7] **Mayle R. E., Dullenkopf K, Schulz A.**, "The turbulence that matters" ASME Journal of Turbomachinery 120 (1998) pp 402-9
- [8] **Mayrhofer N.**, "Optische Strömungsmessung in Turbomaschinen mit Laser-Interferometern" Dissertation (2001), Inst. für Therm. Turbomaschinen und Maschinendynamik, TU – Graz
- [9] **Kiock R., Lehthaus F., Baines N. C., Sieverding C. H.**, "The transonic flow through a plane turbine cascade as measured in four european wind tunnels", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 108 (1986) pp. 277-84
- [10] **Mayrhofer N., Woisetschläger J.**, "Frequency analysis of turbulent compressible flows by laser vibrometry" Experiments in Fluids 31 (2001) pp 153-61
- [11] **Hipp M., Reiterer P., Woisetschläger J., Philipp H., Pretzler G., Fliesser W., Neger T.**, "Application of interferometric fringe evaluation software at Technical University Graz", Proc.SPIE, Vol.3745 (1999) pp 281-92