

S.Moser, J.Woisetschläger, H.Jericha (1999) *LDA-Untersuchung transsonischer Kühlfilme zur Kühlung moderner Gasturbinenschaufeln*, Proc. GALA-Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 7. Fachtagung, Eds.Pfeifer et al., paper 13, Shaker Verlag Aachen

LDA-Untersuchung transsonischer Kühlfilme zur Kühlung moderner Gasturbinenschaufeln

Moser S., Woisetschläger J., Jericha H.
Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25, A-8010 Graz
Tel.: ++43-316-873-7231, Fax: ++43-316-873-7234,
e-mail: moser@ttm.tu-graz.ac.at

Einleitung:

Moderne Hochtemperaturschaufeln müssen durch spezielle Kühlfilme vor der heißen Hauptströmung geschützt werden, wobei insbesondere im Bereich der Schaufelnase vor allem Druckschwankungen den Kühlfilm negativ beeinflussen, ihn sogar von der zu schützenden Schaufeloberfläche abheben. Am Institut für Thermische Turbomaschinen der TU-Graz wurde daher eine spezielle Technik entwickelt, bei der der Kühlfilm überkritisch aus Schlitzen austritt, sich dabei an die Kontur der Schaufel anlegt und daher äußerst resistent gegen Druckschwankungen ist, wie sie z. B. durch Verdichtungsstöße der sich davor befindlichen Leitschaufeln hervorgerufen werden.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt, bei denen vor allem mit optischen Methoden ein Vergleich der Kühlungseffizienz und der Aerodynamik dieses speziellen Kühlfilmes mit konventionellen Kühlfilmen durchgeführt wurde. Im Rahmen dieser hier präsentierten Untersuchung wurden diese Messungen an einem Modell mittels Laser-Doppler-Anemometrie und Schlierenvisualisierung [2] durchgeführt.

Das Ergebnis war ein vollständiger Datensatz, mit dem numerische Vorhersagen bestätigt werden konnten und mit denen die Vorteile dieser neuartigen Kühlungsmethode diskutiert werden konnten.

Versuchsaufbau

Diese experimentelle Untersuchung wurde an einem Plexiglasmodell (Abbildung 1) durchgeführt, welches aus Zuströmung, Schlitz und Kühlebene besteht. Die Zuströmung erfolgt durch die Bohrung mit dem Durchmesser von $d = 20$ mm. Von dieser Bohrung, die eine Kühlkammer einer Turbineschaufel simuliert, zweigt ein Kühlschlitz ab, dessen Strömungsquerschnittsfläche sich kontinuierlich bis auf die Austrittshöhe von $h = 1$ mm verengt obwohl sich bei dieser Konfiguration die Schlitzbreite mit einem Winkel von $\alpha = 20^\circ$ von innen nach außen vergrößert (von $b_1 = 22$ mm bis $b_2 = 44$ mm). Das hat den Zweck, die zu kühlende Fläche zu erhöhen. Die Länge der Kühlplatte beträgt $l = 190$ mm

Die Kühlluft, die sich auf überkritischen Druckniveau befindet, erreicht im engsten Querschnitt ein Machzahl $M = 1$. Beim Austritt in die Umgebung kommt es zu einer Nachexpansion, wobei die Strömung sich an die nachfolgende Kontur – hier eine um $\beta = 20^\circ$ geneigte Platte – aufgrund des bekannten Prandtl-Meyer-Effekts [1] anlegt.

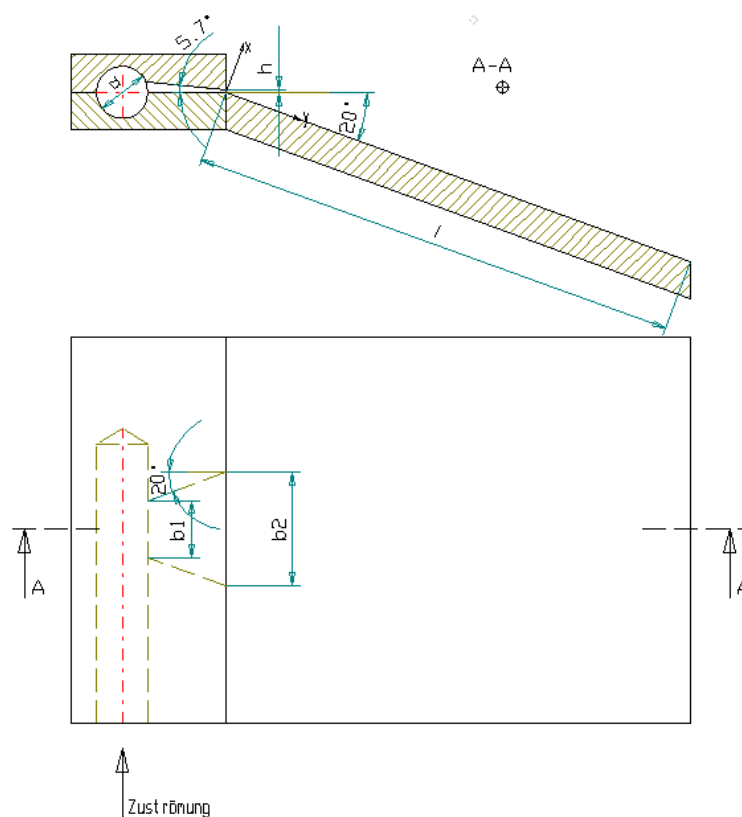


Abbildung 1: Versuchsaufbau

In der Tabelle 1 sind die Versuchsbedingungen zusammengefasst

Medium	Luft
T_{tot} Umgebung	293 K
p_{Umgebung} absolut	0.97458 hPa
T_{tot} Kühlluft	293 K
p_{tot} Kühlluft absolut	2.04458 hPa

Tabelle 1: Versuchsbedingungen

Meßaufbau

Zur Messung der mittleren Geschwindigkeiten und der Schwankungsgrößen wurde ein zweidimensionales Laser Doppler Anemometrie System der Firma Dantec verwendet. Das System (Abbildung 2) besteht unter anderem aus einem 6 Watt Argon-Ionen Laser, 2 57N20/57N35 BSA –Prozessoren und einem 60x41 FiberFlow Transmitter ($\lambda_1 = 514,5 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 488 \text{ nm}$).

Als Optik wurde die 60 mm Sonde (60x67 2D Sonde) mit 38 mm Strahlabstand und 400,7 mm Brennweite eingesetzt, was zusammen mit einem Strahldurchmesser von 2.2 mm (vor der Linse) zu einem Meßvolumen von ca. 2,45 mm Länge und 0.12 mm Durchmesser führt. Die Optik war auf der 3-Achsen Lightweight- 41T50 3D Traversierung von DANTEC montiert.

Als Seeding-Mittel wurde DEHS (Diethylhexylsebacat) verwendet, welches in einem Seeding-Generator AGF2.OD der Firma PALAS mittels Druckluft in Teilchen von ca. $0,3 \mu\text{m}$ Durchmesser zerstäubt wurde.

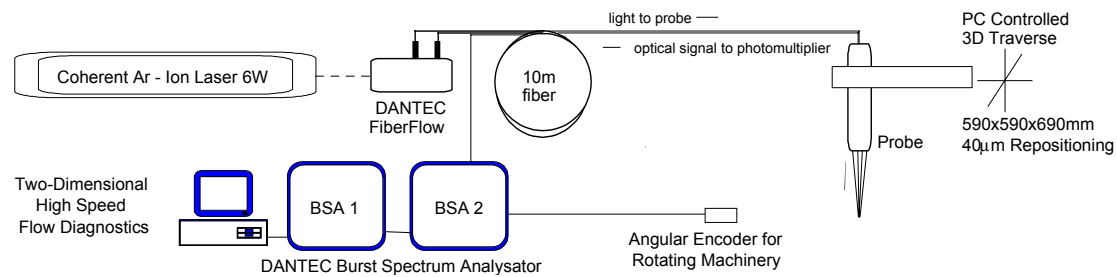


Abbildung 2: 2D-DANTEC-FiberFlow-LDA mit BSA Prozessoren

Die für den Versuch notwendige Luftversorgung erfolgt über die hauseigene Verdichteranlage. Der Massenstrom wird mit Hilfe der beiden Glaskonusdurchflussmesser mit Schwebekörper der Firma Fischer & Porter (**2** und **8**), dessen Genauigkeit je nach Durchflussmenge zwischen 3.2 % und 1.6 % beträgt, gemessen. Die dazu notwendigen Totalzustände wurden in der Beruhigungskammer (**3**) ermittelt nachdem der Druck mit (**1**) geregelt wurde. Die Messung des Durchflusses dient nur zur Kontrolle, da mit dem gemessenen Totalzustand bei Schlitz Eintritt bzw. bei Austritt (hier der Umgebungsdruck) der Massenstrom berechenbar ist.

Mit dem Seeding Generator (**9**) werden die für die LDA-Messung notwendigen Tracerpartikel eingebracht. Der Totaldruck p_{tot} in der Zuströmung des Plexiglasmodells wird mit dem Druckmeßmodul ZOC (**6**) mit Hilfe eines PC's erfaßt. Das verwendete 16 Kanal Druckmeßmodul ZOC14NP/16Px-50 psid von Scanivalve besteht aus zwei Gruppen zu acht Sensoren. Diese Druckmessensoren arbeiten auf Basis eines Halbleiter-Dehnmeßstreifens und können von beiden Seiten mit Druck beaufschlagt werden (Meß- und Referenzdruck). Der Meßbereich erstreckt sich von ± 3.5 bar mit einer Genauigkeit von ± 0.8 % . Um optimale Genauigkeit zu gewährleisten, werden die Sensoren vor jeder Messung kalibriert. Die Totaltemperatur T_{tot} wurde mit einem kalibrierten Fluke 52 (**4**) mit einer Genauigkeit von ± 0.1 % gemessen. Als Temperatursensoren wurden K-Typ Thermoelemente aus ungeschirmten, glasseide-isolierendem Thermodrahtpaar verwendet. Der Übergang wurde durch Laserschweißen hergestellt. Mit dem Umgebungsdruck (**10**) sind alle erforderlichen Strömungsmessgrößen für eine numerische Strömungsvergleichsrechnung definiert.

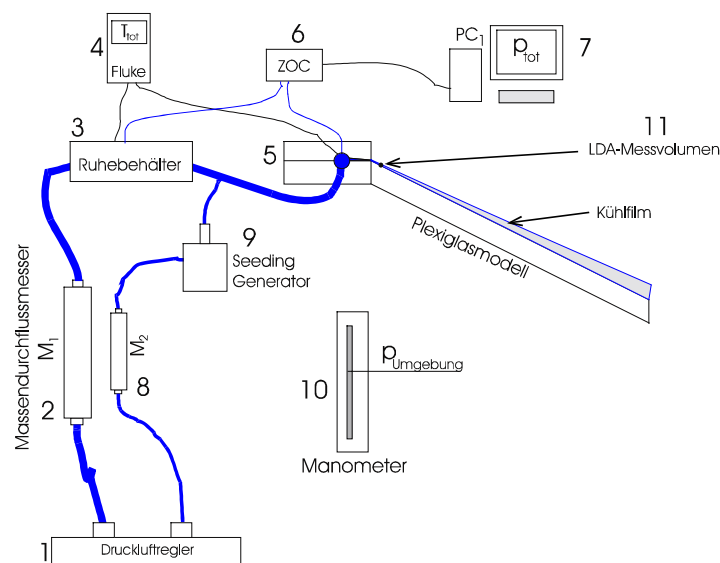


Abbildung 3: Meßaufbau

Ergebnisse

Im folgenden werden einige exemplarische Meßergebnisse vorgestellt und zwar zum einen für das mittlere Strömungsfeld und zum anderen für die turbulenten Größen wobei für die 2D-LDA-Messung isotrope Turbulenz angenommen wurde, das heißt, daß die Schwankungsgeschwindigkeit in der unbekanntem Richtung w' aus den beiden bekannten Komponenten gebildet wird. Die tatsächliche, jedoch unter der oben genannten Annahme gebildete Turbulente Kinetische Energie ergibt sich somit:

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{2}}{2} = \frac{3}{4}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$$

Um eine Idee von den Strömungsverhältnissen zu erhalten, wurde vor den LDA Messungen eine Schlierenuntersuchung durchgeführt. Die Abbildung 4 zeigt ein Schlierenbild der Ausblasung, welches mit $1/8000$ sec. aufgenommen wurde.

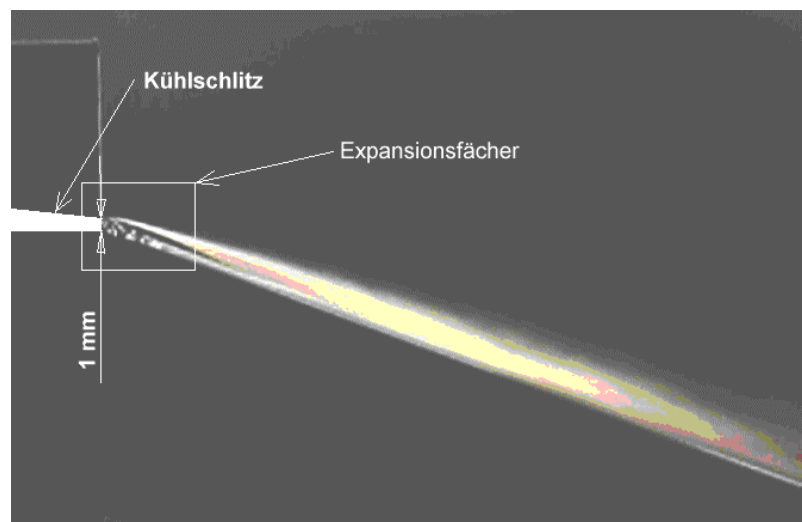


Abbildung 4: Schlierenbild zur Visualisierung der transonischen Ausblasung [2]

Deutlich zu erkennen ist der eingangs erwähnte Expansionsfächer, der sich unmittelbar nach Schlitzaustritt befindet.

In der Abbildung 5 ist ein Ausschnitt der Strömungsvektoren und der turbulenten kinetischen Energien des Kühlfilms kurz nach Schlitzaustritt, wobei die Meßebene in der Schnittebene A-A (siehe Abbildung 1) liegt, gezeigt. Aufgrund der kleinen Grenzschichtdicken konnten diese an der Wand mit dem LDA-System nicht erfaßt werden.

Das Vektor- bzw. Turbulenzfeld zeigt deutlich das Mischungsverhalten der ausgeblasenen Luft, die unmittelbar nach dem Schlitz noch auf den Umgebungsdruck nachexpandiert und an Geschwindigkeit zunimmt und erst danach aufgrund von Reibung und Mischung mit der sich in Ruhe befindlichen Umgebung an Geschwindigkeit verliert. Die gemessene turbulente kinetische Energie bzw. die Reynoldsspannung sind in dieser Scherschicht zur Umgebung, in der die Geschwindigkeitsgradienten am größten sind, sehr hoch.

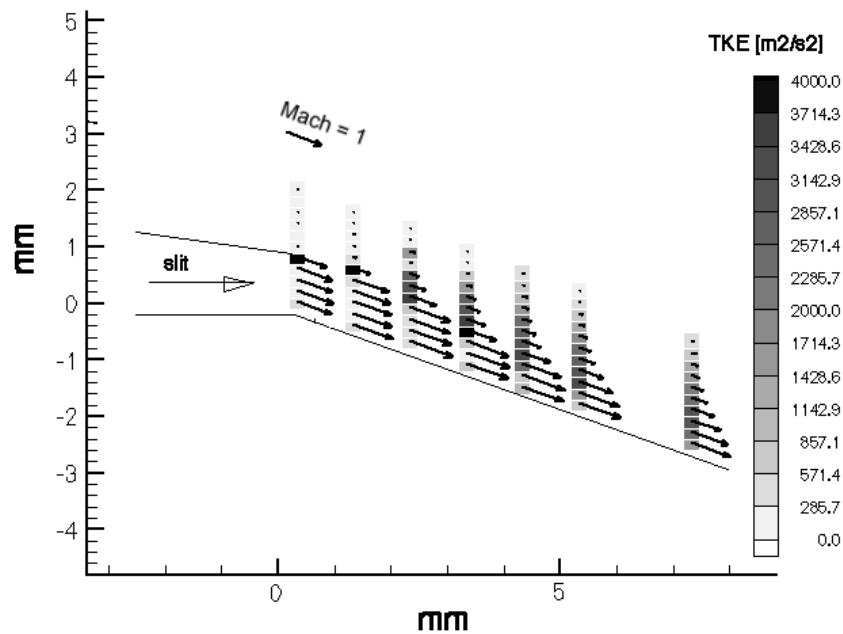


Abbildung 5: Vektorfeld und TKE-Verteilung des Kühlfilms unmittelbar nach dem Kühlschlitz

Aus der Abbildung 6 ist die Geschwindigkeit über Höhe und Länge des Plexiglasmodells dimensionslos aufgetragen.

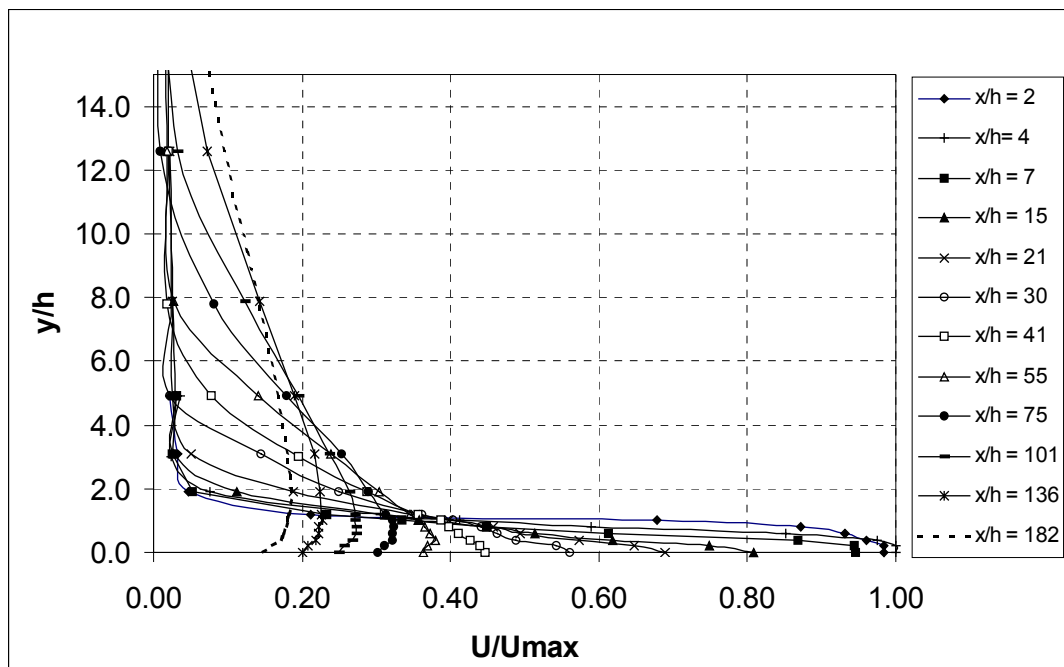


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilung entlang der Plexiglasplatte
Meßebene = Schnitt A-A, siehe Abbildung 1

Die dazugehörigen turbulenten Größen (TKE) sind in der Abbildung 7 gezeigt.

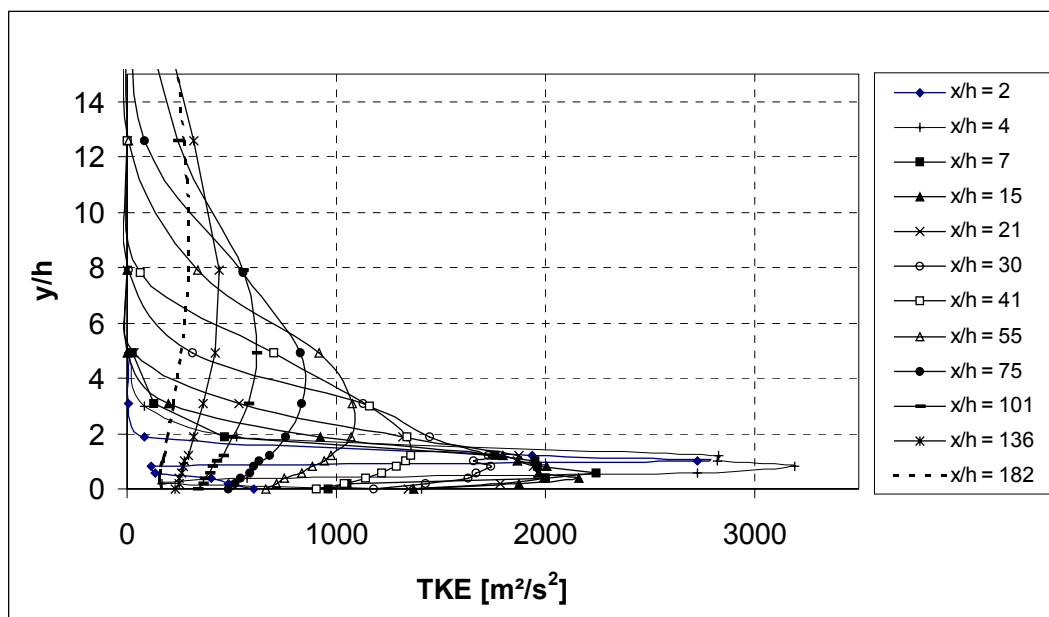


Abbildung 7: TKE-Verteilung entlang der Plexiglasplatte
Meße Ebene = Schnitt A-A, siehe Abbildung 1

Zusammenfassung und Ausblick

Diese hier vorgestellten LDA-Messungen geben einen Einblick in das Geschwindigkeitsfeld einer transsonischen Schlitzausblasung, welche wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung einer Turbinenschaufelkühlung brachte. Zusätzlich zu diesen hier vorgestellten Messungen, wurden am selben Modell Kühlungseffizienz- und Wärmeübergangsmessungen mit dazugehörigen numerischen CFD-Simulationen durchgeführt. All diese Ergebnisse konnten für die nächste Versuchsreihe, welche in einer transsonischen Kaskade, d. h. die Ausblasung erfolgt in ein Hauptströmungsfeld, verwertet werden.

Danksagung

Die experimentelle Untersuchung zur Steigerung der Kühleffizienz erfolgte im Projekt P10698 des Österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF), die optische Meßtechnik wurde durch das Projekt START-Y57 „Nonintrusive Measurement of Turbulence in Turbo Machinery“ des FWF und des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr gefördert.

Literatur

- [1] **Gilchrist, A. R., Gregory-Smith, D. G.**, 1988, „Compressible Coanda Wall Jet: Predictions of Jet Structure and Comparison with Experiment“, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.9, pp 286-295
- [2] **Woisetschläger J., Jericha H., Sanz W., Gollner F.**, 1995, „Optical Investigation of Transonic Wall-Jet Film Cooling“, ASME COGEN TURBO POWER '95