

LASEROPTISCHE VERMESSUNG (PIV) VERZÖGERTER & AKTIV BESCHLEUNIGTER GRENZSCHICHTEN EINER EBENEN TURBINENLAUFSCHAUFELUMSTRÖMUNG

LASEROPTICAL INVESTIGATION OF DELAYED & ACTIVE ACCELERATED BOUNDARY LAYERS ON A PLANAR TURBINEBLATE-FLOW

A. Wojczik* , M. Prinzler , H.-P. Berg****

*Rolls-Royce Dt. Ltd & Co. KG / **BTU Cottbus, Lehrstuhl VFA

PIV, Gasturbine, Filmkühlung, Grenzschichtablösung, Verzögerung

PIV. gas turbine, film cooling, boundary layer separation, delayed boundary layer

Zusammenfassung

Im Rahmen von Untersuchungen zur Filmkühlung von Turbinenschaufeln in Gebieten mit Hauptstromverzögerung wurde mittels Particle Image Velocimetry das zweidimensionale Geschwindigkeitsnahfeld einer Reynolds-ähnlich skalierten Hochdruckturbinenschaufel untersucht. Aus den Geschwindigkeitsfeldern wurden mittels eines selbst entwickelten Auswertalgorithmus lokale Grenzschichtparameter wie Grenzschicht-, Verdrängungs- und Impulsverlustdicke, ermittelt.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte eine Aussage getroffen werden über die Ablöseneigung von Grenzschichten moderner Hochauftriebsprofile von Turbinenschaufeln bei zunehmend negativem Druckgradienten sowie über den Ort und die Höhe des Impulseintrages in die Grenzschicht, der erfolgen muss, um deren Ablösung positiv zu beeinflussen.

Einleitung

Im Zuge zunehmender Globalisierung der Weltwirtschaft und der damit verbundenen wachsenden Mobilität ist für die nächsten Jahrzehnte ein erheblicher Anstieg des Luftverkehrsaufkommens prognostizierbar. Die zivile Luftfahrt muss daher stärker denn je zwei konträren Anforderungen erfüllen. Zusätzlich zu den marktwirtschaftlichen Aspekten gewinnt die Umweltverträglichkeit in Folge der weltweiten Ressourcenverknappung und der aktuell geführten Klimadebatte zunehmend an Bedeutung. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, zielen Turbomaschinenhersteller bei ihren Neuentwicklungen auf eine Steigerung der spezifischen Leistung bei gleichzeitiger Verringerung des Kraftstoffverbrauches und Senkung von Lärm- und Schadstoffemissionen ab.

Ein hohes Potenzial zugunsten geringerer Baugruppengewichte, welche besonders große Auswirkungen vor allem im Bereich der heißen Kerntriebwerkskomponenten auf die oben genannten Entwicklungsziele haben, besteht durch die Optimierung der Aerodynamik der einzelnen Turbinenschaufeln. Durch Erhöhung der Umlenkung und Maximierung des Auftriebes der Schaufelprofile kann eine Steigerung der spezifischen Arbeit herbeigeführt werden. Bei gleichbleibendem Energieumsatz pro Stufe könnte durch dieses Hochauftriebsde-

33.2

sign die angestrebte Reduktion der Schaufelanzahl realisiert werden. Bei Anhebung des Stufenumsatzes wäre weiterhin eine Reduzierung der Gesamtstufenanzahl denkbar.

Derartige Modifikationen erfordern fundierte Kenntnisse über die aerodynamischen Eigenschaften der Schaufelumströmung, da ein derartiges Schaufeldesign durch seine gesteigerte Strömungsumlenkung und die dabei auftretende stärkere lokale Hauptstromverzögerung zu lokalen Grenzschichtablösungen neigt, in deren Wiederanlegegebiet das Heißgas ungehindert auf die Bauteilwand auftrifft und damit die Bauteillebensdauer durch thermische Effekte wie Heißgaskorrosion deutlich reduziert.

Diesem Effekt kann beispielsweise wie in der hier dargestellten Forschungsarbeit mit gezieltem Impulseintrag mittels Kühlluftausblasung in die durch Verzögerung destabilisierte und gegebenenfalls lokal abgelöste Grenzschicht begegnet werden, womit eine „Erholung“ der wandnahen Strömung im Sinne einer stabil anliegenden Grenzschicht angeregt wird.

Experimenteller Versuchsaufbau

Die hier beschriebenen Versuche wurden im Filmkühlprüfstand des Lehrstuhls Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe (VFA) der BTU Cottbus durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen Niedergeschwindigkeitskanal nach Eiffelbauart mit schwenkbarem Einlauf, um gegebenenfalls Fehlanströmungen auf eingebaute Schaufelgeometrien zu induzieren. Der Kanal gewährleistet die Schaufelumströmung mit variabler Grundturbulenz im geforderten Ma – Bereich von $Ma = 0,022$ bis $0,06$.

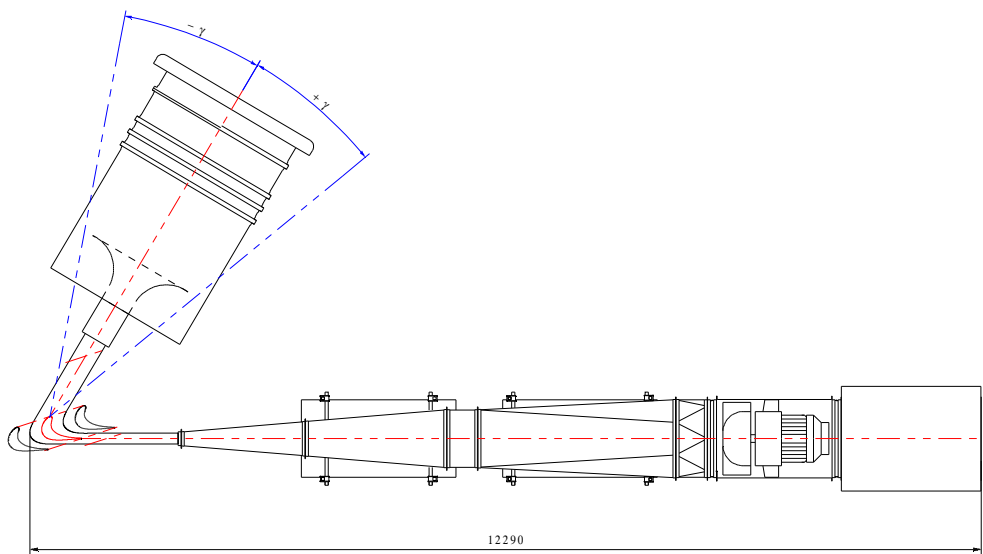


Abb. 1: Filmkühlprüfstand mit ebener Schaufelkaskade (Ansicht von oben)

Die vom Projektpartner Rolls Royce Deutschland stammende experimentelle Schaufelgeometrie einer Laufschaufel der ersten Hochdruckturbinenstufe der BR700 Triebwerksbaureihe weist eine Umlenkung von $120,7$ Grad auf. Zur Wahrung der strömungsmechanischen Ähnlichkeit wurden im Versuchsaufbau die für die Grenzschichtausprägung bedeutsamen Ähnlichkeitsparameter exakt reproduziert. Wie im Realtriebwerk wurde eine Reynoldszahl von 538000 und ein Turbulenzgrad zwischen $2,5$ und 3 Prozent realisiert. Infolge der geringen Strömungsgeschwindigkeiten wird die Schaufel inkompressibel umströmt. Die damit im Vergleich zum Realtriebwerk fehlende, auf Stoß-Grenzschicht-Interferenzen beruhende Transition wurde durch eine künstliche Fixierung der Transition simuliert.



Abb. 2: Messstrecke und Ausblasekonfiguration

Die zu untersuchende Schaufel-„Kaskade“ besteht aus einer Schaufel und zwei sie umgebenden Schaufel - Halbpässen, wobei die die Messstrecke begrenzenden Seitenwände entlang einer numerisch berechneten Stromlinie positioniert sind, welche an der Mittelachse der Passage verläuft. Dieser vom üblichen Kaskadenexperiment deutlich abweichende Aufbau wurde gewählt, um eine maximale Vergrößerung des Schaufelmodells gegenüber der Realgeometrie zu erzeugen mit dem Ziel, sehr hochaufgelöste Versuchsergebnisse zu erhalten.

Die Seitenwände sind aus 2,5mm starken durchsichtigen Polycarbonatplatten gefertigt, wodurch eine für lasermetrische Untersuchungen notwendige optische Zugänglichkeit zum Inneren der Messstrecke gewährleistet ist. In regelmäßigen Abständen sind die Seitenwände mit Stützstäben verstärkt, welche die ebene Formtreue der ursprünglich stark flexiblen Seitenwand in vertikaler Richtung unterstützen und zusätzlich die Positionierung und Fixierung der Seitenwände in der Horizontalen gestatten. Durch diese so genannte Seitenwand – Adaption kann die Position der Seitenwände dem Verlauf der Stromlinie angepasst werden.

Für die Arbeit war insbesondere der durch Strömungsverzögerung gekennzeichnete, hintere leeseitige Schaufelbereich von Bedeutung.

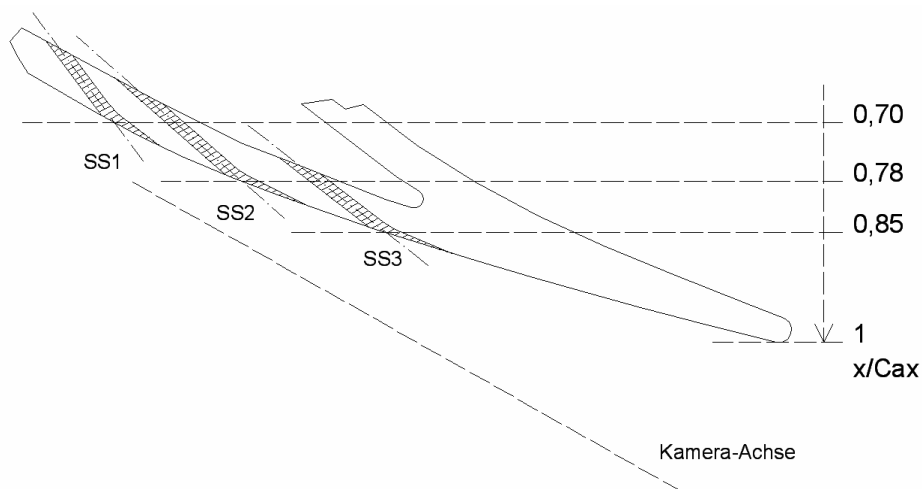


Abb. 3: Schaufelhinterkante mit Kühlluftbohrungspositionen

Versuchsdurchführung

Im ersten Teil der Arbeit wurde der Strömungszustand unter Auslegungsbedingungen, also ohne aktive Kühlluftausblasung analysiert. Mittels der adaptiven Kanalwand wurde der Strömung der dem Designpunkt entsprechende Druckgradient aufgeprägt, was durch die Instrumentierung mit statischen Druckbohrungen überwacht wurde.

Anschließend wurden entlang der Schaufelkontur zwischen 65 und 100 Prozent axialer Sehnenlänge PIV-Strömungsfelder aufgezeichnet. Dem teilweise instationären Strömungsverhalten wurde bei allen Experimenten durch entsprechende Mittelung der über einen längeren Zeitraum aufgezeichneten Messwerte Rechnung getragen. Hierfür erfolgte nach der auf Kreuzkorrelation basierenden Auswertung der Helligkeitsverschiebungen eine Mittelung der Verschiebungsvektoren in Betrag und Richtung. Zur Gewährleistung einer lückenlosen Auswertung der Grenzschichtbeschaffenheit wurde mittels MatLab® aus den lokalen Vektorfeldern ein geschlossenes Strömungsfeld generiert.

Aus den so gewonnenen Geschwindigkeitsverteilungen wurden mittels des entwickelten Auswertalgorithmus die lokalen Grenzschichtparameter Grenzschicht-, Verdrängungs- und Impulsverlustdicke, die Geschwindigkeit am Grenzschichttrand, der Formparameter und die lokalen Grenzschichtprofile berechnet.

Experiment und Auswertung wurden anschließend bei aktivierter Kühlluftausblasung wiederholt. Hierfür wurde die aus insgesamt drei Kühlluftbohrungsreihen bestehende Kühlkonfiguration sowohl in den einzelnen Bohrungsreihen als auch in der Ausblasrate variiert. In Abhängigkeit vom eingebrachten Kühlluftimpuls konnte dadurch die Grenzschicht im gesamten Messbereich bezüglich Stabilität unter dem Einfluss des Druckgradienten analysiert werden. Für bestimmte Konfigurationen konnte durch Einbringen kinetischer Energie in die wandnahe Strömung eine Beschleunigung und Stabilisierung der generell instabilen und ablösegefährdeten Grenzschicht realisiert werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ausgehend von der untersuchten Konfiguration ein Strömungszustand herbei geführt, der die saugseitige Strömung im Bereich von 65 bis 100% axialer Sehnenlänge mit einem deutlich gesteigerten negativen Druckgradienten belastet. Mittels der adaptiven Kanalwände wurde die lokale Umströmung der Turbinenschaufel bei gesteigertem Arbeitsumsatz simuliert.

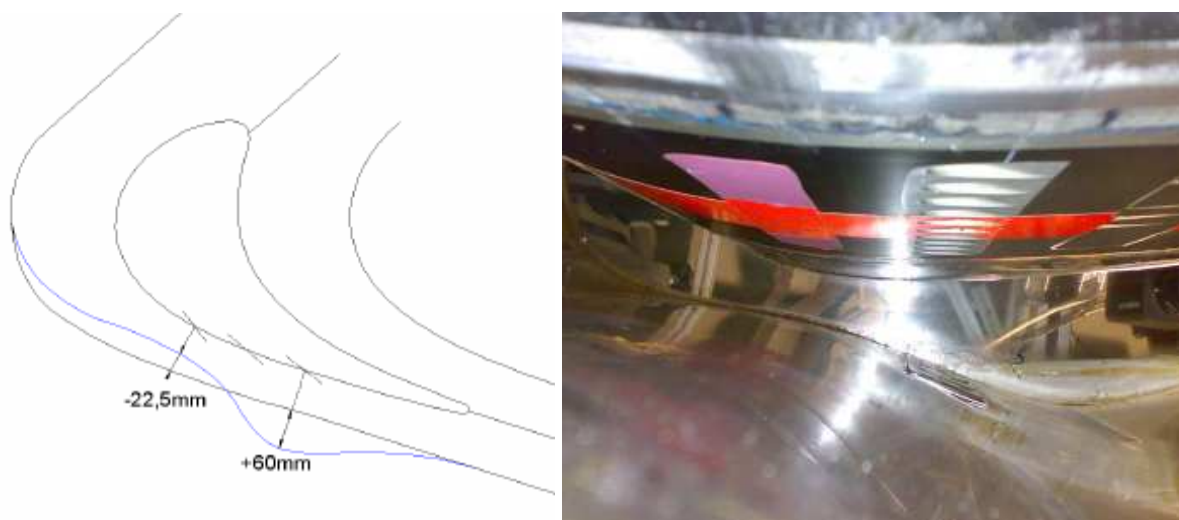


Abb. 4: Modifikation der saugseitigen Gegenkontur (Seitenwandkonfiguration 40)

Letztendlich wurde durch Aufweitung des Strömungsquerschnittes das Verzögerungspotenzial der Strömung soweit ausgereizt, dass die Grenzschicht lokal eindeutige Merkmale für einen ablösenahen beziehungsweise abgelösten Strömungszustand aufweist. Der Strömungszustand während der sukzessiven Entfernung vom Schaufelauslegungspunkt wurde anhand von lokalen Druck-/ Machzahlprofilen überwacht.

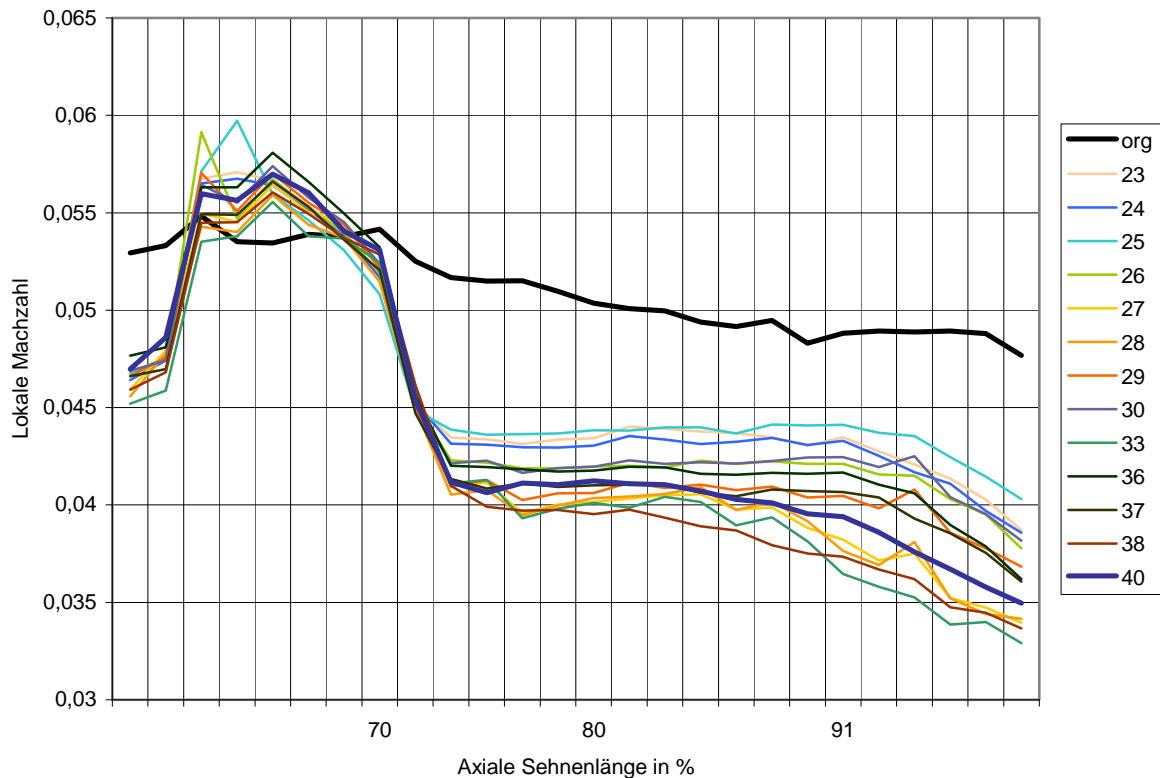


Abb. 5: Machzahlverteilungen bei inaktiver Ausblasung mit erkennbaren Ablösegebieten

Die derart destabilisierte Grenzschicht sollte durch gezieltes Beschleunigen der wandnahen Strömung wieder stabilisiert werden. Durch eine „Zweckentfremdung“ der zur thermischen Isolierung konzipierten Kühlluftausblasung wurde der erforderliche Impulseintrag realisiert. Auch hierfür wurde die Kühlluftausblasung durch die in ihrer Architektur unveränderten Bohrungsreihen in ihrer Ausblasrate, als auch durch separate Aktivierung oder Deaktivierung einzelner Kühlluftbohrungsreihen variiert.

Bestimmung der Grenzschichtparameter

Der mit der Aufweitung des Strömungskanals verbundene negative Druckgradient destabilisiert die Grenzschicht und erhöht die Gefahr lokaler Strömungsablösung. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Algorithmus zur Quantifizierung des Grenzschichtcharakters anhand hochaufgelöster PIV-Aufnahmen entwickelt.

Dessen Aufgabe ist es, anhand der Strömungsparameter Grenzschicht-, Verdrängungs- und Impulsverlustdicke, Geschwindigkeit am Grenzschichttrand, Formparameter und die lokalen Grenzschichtprofile den Grenzschichtcharakter kritisch auf den Einfluss des eingebrachten Kühlluftimpulses zu untersuchen.

33.6

Neben den zuvor ermittelten Machzahlprofilen sollen am Ende der Auswertung die folgenden Parameter für jede durchgeführte Messkampagne berechnet und graphisch dargestellt werden:

- lokale Grenzschichtprofile (Verteilungen der wandparallelen Geschwindigkeiten)
- Position und Ausdehnung möglicher Ablösegebiete, charakterisiert durch:
 - o Trennstromlinie, die ein mögliches Ablösegebiet von der Hauptströmung unterteilt (Verbindungsline der Wandabstände, bei dem sich negativer Volumenstrom infolge Rückströmung mit positivem Volumenstrom der Hauptströmung aufheben)
 - o Stromlinie, entlang derer die Tangentialgeschwindigkeit den Wert Null aufweist (Verbindungsline der Wandabstände, bei denen die lokalen Tangentialgeschwindigkeitsverläufe ihren Nulldurchgang aufweisen).

Nach dem Einlesen der Vektorfelder wird vom Algorithmus entlang der kleinsten Positionen in x-Richtung die Profilkontur der Schaufel als Polynom zweiter Ordnung approximiert. Im zweiten Arbeitsschritt werden entlang der approximierten Profilkontur Flächennormalen gebildet. Die Dichte der Flächennormalen entspricht dabei der Auflösung der aufgezeichneten Vektorfelder. Entlang dieser Normalen, welche ausgehend von der erzeugten Profiloberfläche eine definierte Länge von 35 Millimetern haben, werden im Abstand von jeweils 0,5 Millimetern Tangentialgeschwindigkeiten interpoliert. Das heißt, aus den realen an dieser Stelle gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten werden die wandparallelen Geschwindigkeitskomponenten berechnet und gemäß ihrer Position gespeichert. Je Flächennormale wird ein Geschwindigkeitsprofil, bestehend aus 70 tangentialen Geschwindigkeiten, berechnet.

Nach der Berechnung der Tangentialgeschwindigkeiten werden Maximalwert und Nulldurchgang entlang jeder Flächennormalen ermittelt. Der Wandabstand dieses Maximalwertes wird als Grenzschichtdicke δ definiert. Die jeweiligen maximalen Geschwindigkeiten werden als Geschwindigkeit am Grenzschichttrand gespeichert. Aus den so ermittelten wandnahen Geschwindigkeitsprofilen wird anschließend die Trennstromlinie bestimmt. Als Integrand für die Berechnung dient die zuvor ermittelte Grenzschichtdicke.

Mittels einer CAD-Rekonstruktion der Schaufelhinterkante einschließlich der stromauf befindlichen Kühlluftbohrungen werden für jede Konfiguration die genauen Schnittpunkte der Bohrungsmittelachsen der Kühlluftbohrungen mit der Schaufelkontur berechnet. Der Engquerschnitt jeder Bohrung dient als Maß für die stromauf und stromab liegenden Darstellungspositionen. Jeweils an den geradzahigen Vielfachen dieses Bohrungsdurchmessers sowie an den Austrittspunkten der Kühlluftstrahlen werden die lokalen Grenzschichtparameter abgebildet.

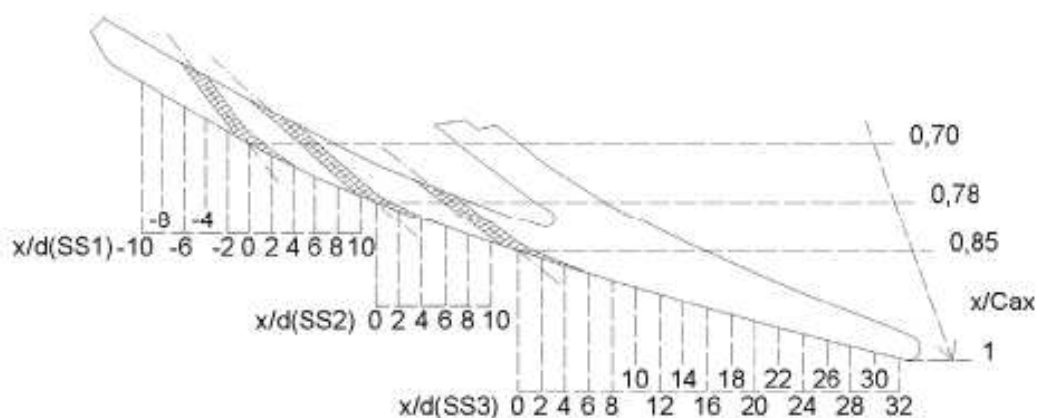


Abb. 6: Schaufelhinterkante mit Kühlluftbohrungen und den sich aus den geradzahigen Vielfachen des Bohrungsdurchmessers ergebenden Auswertepositionen

Messtechnische Probleme bei der Versuchsdurchführung

Während der PIV – Vermessung der Strömungsfelder wurde bewusst auf den Komfort einer vollständig automatisierten Auswertung verzichtet. Jegliche Validierung der Bilder wurde per Augenschein verfolgt. Der hohe Aufwand dieser empirischen Vorgehensweise wird dadurch gerechtfertigt, dass von vorn herein eine minimale Fehlerquote der ausgewerteten Vektorfelder und somit der Anteil an Daten, die nicht den festgelegten Filterkriterien genügen, sicher gestellt wird.

Bei den PIV-Messungen selbst aufgetretene Fehlinterpretationen haben ihre Ursache im Allgemeinen im fehlenden „matching“ der Helligkeitsverschiebungen zwischen den zusammengehörenden Kreuzkorrelationsbildern. Ein möglicher Grund hierfür ist bekanntlich vor allem im wandnahen Bereich eine zu geringe Partikeldichte der Strömung innerhalb der Messebene. Zur Sicherstellung einer ausreichend hohen Partikelanzahl bei gleichzeitig homogener Verteilung der Partikel erfolgt das Seeding der Hauptströmung bereits im Kanaleinlauf. Bis zum Erreichen der Beruhigungskammer wird somit eine ausreichende Durchmischung der Luft mit Öltröpfchen gewährleistet. Da bedingt durch den Magnuseffekt die Partikeldichte innerhalb der Grenzschicht entlang überströmter Oberflächen mit der Lauflänge wieder abnimmt, wird zusätzlich ein Seeding der Kühlluft durchgeführt. Dies gewährleistet auch im Bereich der Schaufelhinterkante eine noch ausreichend hohe Partikeldichte innerhalb der Grenzschicht.

Darüber hinaus wird die Schaufeloberfläche in Höhe des Lichtschnittes mit einer speziellen Fluoreszenzfolie beschichtet, um insbesondere die an geometrischen Unstetigkeiten auftretenden Reflektionen zu minimieren. Durch ihre optischen Eigenschaften bewirkt die Folie eine geringe Frequenzverschiebung des von ihr reflektierten Lichts. Partikel, die durch solches Streulicht erhellt werden, entziehen sich dem durch einen Bandpassfilter begrenzten Spektrum des CCD-Chips der Kamera, wodurch die Fehlinterpretationen in Wandnähe erfolgreich minimiert werden.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Konfiguration von Schaufel und Kamera begründet. Dieser „perspektivische“ Fehler suggeriert im Bereich von Kühlluftbohrungen unmittelbar an der Wand höhere Strömungsgeschwindigkeiten als im Hauptstrom und scheint damit die Wandhaftbedingung zu entkräften. Innerhalb der für die Kamera unsichtbaren Bohrung existiert selbstverständlich eine Grenzschicht. Tritt dieser Effekt innerhalb eines Ablösegebietes auf, scheint sich der Nulldurchgang der lokalen Geschwindigkeitsverteilungen zu einem größeren Wandabstand zu verschieben, teilweise bis außerhalb des Ablösegebietes. Dies ergibt physikalisch keinen Sinn, insbesondere wenn die Strömung in diesem Bereich anliegt. Entsprechende Ergebnisse wurden somit vernachlässigt.

Die Interpolation der Profilkontur entlang der kleinsten Gitterpunkte in x-Richtung als Polynom zweiter Ordnung generiert einen maximalen Fehler in der Größenordnung eines Interrogation Spots. Die interpolierte Kontur verschiebt sich dadurch um maximal 0,62 Millimeter. Da die Annäherung an die gewölbte Profilkontur mittels rechteckig geformter Interrogation Spot bereits fehlerbehaftet ist, wird der sich ergebende Fehler vernachlässigt.

Zur Verifizierung der durch den Auswertalgorithmus berechneten Strömungsparameter erfolgte eine Gegenüberstellung der tangentialen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der zur Kanalsteuerung herangezogenen statischen Druckbohrung. Die aus den PIV-Messungen generierten Strömungsgeschwindigkeiten am Grenzschichtrand weichen um einen maximalen Fehler von 1,8 Prozent von der pneumatisch bestimmten Strömungsgeschwindigkeit ab und sind daher als hinreichend exakt anzusehen. Auf die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten in direkter Wandnähe wirken sich die schlechtere Korrelierbarkeit infolge der

geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der unteren Grenzschicht sowie die vom Magnuseffekt bedingt niedrigere Partikeldichte negativ aus. Die Aussagekraft der ermittelten Parameter im wandnächsten Bereich ist daher deutlich eingeschränkt.

Bewertung der Versuchsergebnisse

Infolge der Untersuchungen wurde erkannt, dass eine gute Kühlfilmeffektivität und ein hoher aerodynamischer Wirkungsgrad konträre Ansprüche an das Design von Schaufel und Ausblasarchitektur stellen. Mit genügend großen Kühlluftmassenströmen läßt sich nahezu unabhängig von der untersuchten Bohrungskonfiguration die erzwungene saugseitige Strömungsablösung bekämpfen, selbst wenn der Impulseintrag durch die Ausblasung im Bereich des erzeugten Engquerschnittes erfolgte.

Wurde jedoch auf einen geringen Kühlluftverbrauch geachtet, schieden bei der hier untersuchten modifizierten Kaskade jegliche Konfigurationen mit einer aktiven ersten Bohrungsreihe aus. Sie wirkte sich unabhängig von der Ausblasrate wie eine weitere Einschnürung des Strömungskanals im Bereich des Engquerschnittes aus und verzögerte die Strömung im stromab folgenden, sich erweiternden Querschnitt zusätzlich.

Das angestrebte Ziel, Konfigurationen zu finden, welche eine effektive Grenzschichtstabilisierung inklusive vollständiger Bekämpfung der erzwungenen Ablösung mit Ausblasraten kleiner 1 ermöglichen, wurde nur bedingt erreicht. Selbst die unter diesem Aspekt wirkungsvollsten Kühlkonfigurationen erforderten Ausblasraten über 1, so auch die Konfiguration SS23, deren Ergebnisse nachfolgend exemplarisch dargestellt sind.

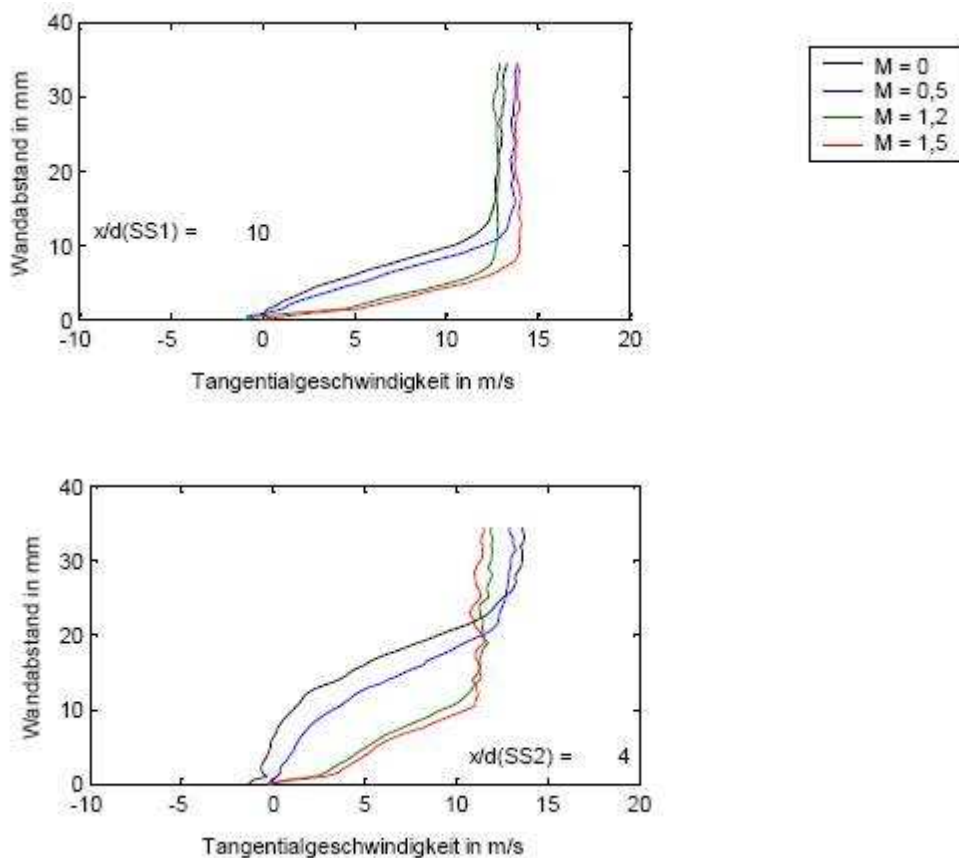


Abb. 7: exemplarische Grenzschichtverläufe der Ausblasekonfiguration SS23 mit aktiver Ausblasung