

OPTISCHE MESSVERFAHREN UND STRÖMUNGSVISUALISIERUNG BEI DER UNTERSUCHUNG FILMGEKÜHLTER TURBINENSCHAUFEL-HINTERKANTEN

J. Hinkeldey, T. Horbach, A. Schulz, H.-J. Bauer
Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Zusammenfassung

Die immer weiter steigenden Turbineneintrittstemperaturen liegen bereits über den zulässigen Werten für die verwendeten Werkstoffe. Daher muss besonderer Wert auf die Bauteilkühlung gelegt werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung der Kühlluftausblasung an einer zurückgeschnittenen Turbinenschaufelhinterkante. Bei der Spaltausblasung soll sich die Luft als Film zwischen Bauteil und Heißgas legen. Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Ausblasung Ablösewirbel an der Ausblaselippe entstehen, die den Kühlfilm maßgeblich beeinflussen.

Ziel dieser Arbeit war, geeignete Verfahren zur Visualisierung und zur optischen Strömungsmessung zu finden, mit deren Hilfe sich Informationen über das Strömungsverhalten nach der Ausblasung gewinnen lassen. Dabei standen die technische Realisierbarkeit der Messung und die Komplexität des Messaufbaus, wie auch die Qualität der erfassten Daten im Mittelpunkt.

Es wurden Visualisierungen durch Partikel in der Strömung und mit Hilfe des Schlierenverfahrens durchgeführt und die optischen Messtechniken „Particle Image Velocimetry“ (PIV) sowie „Background Oriented Schlieren“ (BOS) angewandt. Die einzelnen Verfahren werden zunächst vorgestellt und auf ihre Eignung hinsichtlich des beschriebenen Anwendungsfalles überprüft. Im Anschluss werden Ergebnisse der einzelnen Verfahren präsentiert. Die geeigneten Untersuchungsmethoden können dann für eine Optimierung der Kühlluftausblasung, insbesondere hinsichtlich der Geometrie des Ausblasespaltes genutzt werden.

1. EINLEITUNG

Eine weitere Wirkungsgradsteigerung für Gasturbinen bedeutet eine Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur und des Druckverhältnisses sowie eine Wirkungsgradverbesserung der einzelnen Komponenten.

Um die Turbineneintrittstemperatur erhöhen zu können, müssen die Bauteile, insbesondere die Brennkammern und die ersten Reihen der Turbinenschaufeln, besser gekühlt werden. Gerade die Kühlung der Hinterkante einer Turbinenschaufel stellt eine besondere Herausforderung dar. Einerseits soll die Hinterkante aus aerodynamischen Gründen möglichst dünn ausgeführt sein. Andererseits erfordern Kühlkanäle im Inneren eine Mindestdicke der Schaufel, um eine ausreichende Festigkeit zu gewährleisten. Ein Ansatz beiden Forderungen gerecht zu werden ist die in dieser Arbeit untersuchte zurückgeschnittene Hinterkante. Die ausgeblasene Luft soll sich als Film zwischen Bauteil und Heißgas legen. Bei der Ausblasung entstehen an der Ausblaselippe Ablösewirbel, die den Kühlfilm maßgeblich beeinflussen. Im Vorfeld wurden sowohl experimentelle Versuche [1] als auch numerische Simulationen dazu durchgeführt [2, 3, 4, 5]. Besonders über den Nahbereich direkt nach der Kühlluftausblasung ist bislang allerdings wenig bekannt. In dieser Arbeit werden daher geeignete Verfahren zur Visualisierung und zur optischen Strömungsmessung gesucht, um in diesem Bereich Informationen über die Strömungszustände zu erhalten.

Für die einzelnen Verfahren wird die Komplexität des Aufbaus, die Anforderungen an die Komponenten und die Qualität der ermittelten Ergebnisse bewertet.

Zunächst werden der verwendete Strömungskanal und die Modelle der Schaufelhinterkanten, die bei den Untersuchungen verwendet wurden, beschrieben. Anschließend werden verschiedene Visualisierungsverfahren und Strömungsmesstechniken erläutert. Die Ergebnisse der einzelnen Verfahren werden im darauf folgenden Abschnitt vorgestellt und diskutiert.

2. FILMKÜHLUNG

Die Filmkühlung ist eine häufig angewandte Methode zur Schaufelkühlung. Bei dieser Methode wird Kühlluft auf die Heißgasseite der Schaufel aufgebracht, die sich zu einem schützenden Film zwischen dem Werkstoff und dem Hauptstrom ausbildet. Die verschiedenen Filmkühlverfahren unterscheiden sich durch die Ausblasung aus dem Schaufelinneren. Die hier angewendete Spaltausblasung (s. Bild 1), bei der die Luft tangential zur Wand in einem kontinuierlichen Film ausströmt, führt zu einer strukturellen Schwächung des Bauteils durch den durchgehenden Spalt. Dies spielt gerade im Bereich der Schaufelhinterkante eine entscheidende Rolle. In der Praxis ist daher eine Versteifung der Schaufel durch Reihen von Rippen oder Pins im Kühlkanal erforderlich.

Durch Vermischung mit dem Heißgasstrom und Erwärmung der Kühlluft verliert der Kühlfilm mit zunehmender Entfernung von der Ausblasestelle an Wirkung. Wenn die zulässige Materialtemperatur erreicht wird, muss der Kühlfilm erneuert werden, was eine erneute Ausblasung erfordert.

Der nach dem Verdichter entnommene Kühlluftstrom nimmt nicht am Kreisprozess teil. Dieser Teil der Verdichterarbeit muss also als Verlust betrachtet werden. Daher ist das Ziel der Optimierung auch immer eine Einsparung der Kühlluftmenge.

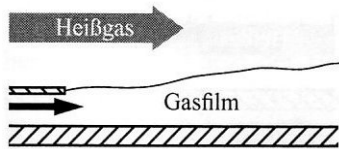


BILD 1. Filmkühlung durch Spaltausblasung [6]

2.1. Turbinenschaufelhinterkante

Um nachlaufinduzierte Druckverluste zu minimieren, müssen die Schaufelhinterkanten so dünn wie möglich sein. Die Dicke war bislang durch Wandstärken, die den auftretenden Kräften noch standhalten und durch die Größe der Kühlnäle im Inneren der Schaufel begrenzt (s. Bild 2 oben).

Um diese Probleme zu umgehen, wurde ein so genanntes „trailing edge cut-back“ (Zurückgeschnittene Hinterkante) Modell, bei dem die Druckseite der Schaufel verkürzt wird und so ein Ausblasespalt für die Kühlluft entsteht, verwendet. Die Hinterkante selbst kann dadurch sehr viel dünner gefertigt werden. Im Schaufelmodell wurden die Druck- und Saugseite im Inneren durch Rippen oder zylindrische Stifte (sog. Pin Fins) verbunden, was für eine steifere Struktur sorgt und den konvektiven Wärmeübergang vor der Ausblasung aus der Hinterkante erhöht (s. Bild 2 unten).

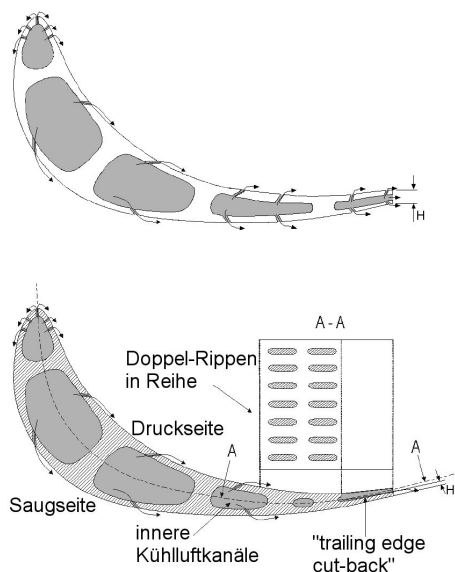


BILD 2. Schaufel mit herkömmlicher Kühlung und Schaufel mit „trailing edge cut-back“ [2]

In der Praxis finden solche Versteifungen häufig Anwendung um die strukturelle Schwächung durch den durchgehenden Spalt der Kühlluftausblasung zu vermindern. Es wurden Untersuchungen mit einer Pin- und einer Rippenkonfiguration im Kühlkanal durchgeführt, um auch diese Einflussparameter der Wirbelablösungen beobachten zu können.

2.2. Bisherige Entwicklung

Versuche zur Spaltausblasung wurden von Sivasegaram und Whitelaw [7], Mukherjee [8] und Taslim et al. [9] mit unterschiedlichen Ausblaselippendicken und -winkeln durchgeführt. Bittlinger [10] untersuchte eine tangentielle Spaltausblasung. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass das Verhältnis von Lippendicke zur Spalthöhe eine wesentliche Einflussgröße ist. Wie auch Kapteijn et al. [11] und Martini et al. [1, 2, 3, 4] untersuchten sie die „Trailing Edge Cut-Back“ Konfiguration. Sie messen der Form der Ausblaselippe und der versteifenden Rippen oder Pins eine deutliche Bedeutung bei.

An ähnlichen Strömungsphänomenen wie dem hier untersuchten Fall, wurde schon mit optische Strömungsmessmethoden gearbeitet. Raffel und Kost [12] setzten die Particle Image Velocimetry (PIV) beispielsweise schon bei der Turbinenschaufelhinterkantenausblasung ein. Martiny et al. [13] nutzten die Möglichkeiten der Infrarot-Thermografie an einer Effusionsplatte. Baldauf [6] verwendet diese Methode für die Untersuchung von Filmkühlung.

Auch auf dem Gebiet der numerischen Strömungssimulation wurden bereits einige Untersuchungen zur Filmkühlung durchgeführt. Vogel [14] stellt in seiner Arbeit einen numerischen Lösungsansatz mit Hilfe eines „expliziten Multi-Block Navier-Stokes Löser“ vor. Bittlinger [10] berechnete ähnliche Strömungsprobleme bei der Kühlung der Brennkammerwand. Walters und Leylek [15] stellen ihre Simulationsmethode an Hand von Daten zur Lochausblasung vor und vergleichen sie mit experimentellen Daten. Martini et al. [4] haben in numerischen Simulationen intensive instationäre Wirbelablösungen an der Ausblaselippe festgestellt, die als Ablösungen umströmter Körper, wie beispielsweise bei der von Kármán'schen Wirbelstrasse, beschrieben wurden. Spaltausblasung berechneten Horbach et al. [5] unter Verwendung der „Detached-Eddy Simulation“.

2.3. Motivation

Bei der Ausblasung entstehen durch die Umströmung der Ausblaselippe Wirbel, die sich entlang der zu kühlenden Wand bewegen. Sie vermischen Kühlfilm und Heißgas und haben so einen deutlichen Einfluss auf die Abnahme der Filmkühleffektivität. Bild 3 zeigt eine Temperaturverteilung aus einer numerischen Simulation von Horbach [16]. Niedrige Temperaturen werden dabei dunkel dargestellt, hohe hell. Es ist deutlich die Ausbreitung der Wirbel im Nahbereich zu erkennen. Mit zunehmendem Abstand zur Ausblasestelle werden die Konturen unschärfer. Die Kühlluft vermischt sich zunehmend mit der Heißgasströmung.

Im vorliegenden Modell treten nach einer Abschätzung von Martini et al [1] Ablösefrequenzen von circa $f=2,5$ kHz auf. Um die Verminderung der Kühlfilmeffektivität durch

diese Wirbel zu begrenzen, müssen die maßgeblichen Parameter und Mechanismen für das Verhalten der Strömung direkt nach diesen Ablösevorgängen bekannt sein.

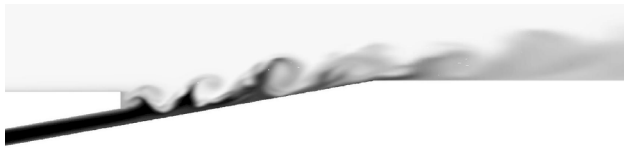


BILD 3. Temperaturverteilung aus einer numerischen Simulation [16]

3. AUFBAU DES MESSKANALS

Für die Untersuchungen des Kühlfilmverhaltens wurde ein um Faktor 10 vergrößertes generisches Modell einer Schaufelhinterkante in einen atmosphärischen Heißluftkanal eingebaut und mit einem Kühlluftanschluss versehen. Dabei wurden die relevanten Ähnlichkeitskennzahlen, wie die Reynoldszahl, das Dichteverhältnis und die Ausblaserate eingehalten.

Der prinzipielle Aufbau des Messkanals wird in Bild 4 dargestellt. Der Luftstrom für den Heißgasstrang wird von einem Verdichter mit einem maximalen Luftmassenstrom von 3 kg/s und einem Druckverhältnis von 1,5 erzeugt. Ein Drallregler vor dem Verdichtereintritt und ein Ventil am Bypass gewährleistet die Regelbarkeit des Luftmassenstromes durch die Messstrecke. Um die gewünschte Heißgastemperatur zu erreichen ist in dem Kanal eine elektrische Heizung mit einer Gesamtleistung von 270 kW installiert. Es folgen ein Plenum, mehrere Verwirbelungsbleche, Siebe und Wabenprofile, um in der Strömung eine homogene Temperaturverteilung zu erreichen und die Turbulenzen zu reduzieren. Anschließend gelangt die Strömung von dem runden Querschnitt der Heizung durch eine Düse in den rechteckigen Kanal. Hinter der Düse ist in die Strömung ein Turbulenzgitter eingebracht, das einen definierten Turbulenzgrad an der Stelle der Ausblasung von 7% erzeugt. Die Auslegung des Turbulenzgitters erfolgte nach einer Korrelation von Roach [17]. Weiter stromab wird die Grenzschicht an der unteren Kanalwand auf einer Höhe von 20 mm abgezweigt, damit sich die Grenzschicht neu ausbilden kann und vorangegangene Störeinflüsse minimiert werden. Der weiterführende Kanal hat dann noch eine Höhe von 80 mm.

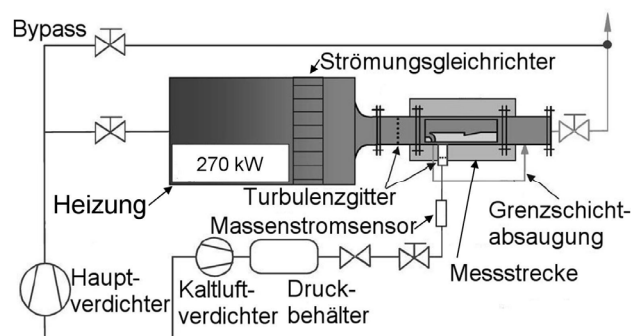


BILD 4. Komponenten des Messkanals [1]

Nach Durchlaufen der Messstrecke, die im Folgenden näher beschrieben wird, wird die Hauptströmung zusammen mit dem abgeleiteten Grenzschichtstrom durch einen Kamin abgeführt.

Die Kühlluft wird von einem weiteren Verdichter mit einem Druck von 7 bar bei Raumtemperatur in einem Druckbehälter bereitgestellt. Über einen Druckminderer und ein Ventil wird der Kühlluftmassenstrom reguliert. Der Kühlluftanschluss wird auf einen Rechteckquerschnitt mit der Kanalbreite gebracht. Ein Turbulenzgitter sichert auch hier einen definierten Turbulenzgrad des Luftstromes. Für das bei verschiedenen Messverfahren benötigte Einbringen von Partikeln in die Kühlluft ist an der Überleitung auf den Rechteckquerschnitt ein Anschluss für den Partikelgenerator vorgesehen.

3.1. Messstrecke

Der Bereich der Messstrecke ist in Bild 4 hervorgehoben. Bild 5 zeigt detailliert den Aufbau. Die Messstrecke ist in die folgenden drei Bereiche gegliedert:

- L1: abnehmende Kühlluftkanalhöhe; Oberseite horizontal; Unterseite 10° geneigt
- L2: konstante Kühlluftkanalhöhe; Ober- und Unterseite parallel und 10° geneigt
- L3: Ausblasung und Vermischung; Kanalunterseite weiterhin 10° geneigt

Charakteristische Größen für die Ausblasung sind die Lippendicke H_L und die Spalthöhe H_{Sp} .

Um das Verhalten des Kühlfilms zu untersuchen, lassen sich in den Kanal im Bereich L1 und L2 verschiedene Turbulator-Konfigurationen einbauen.

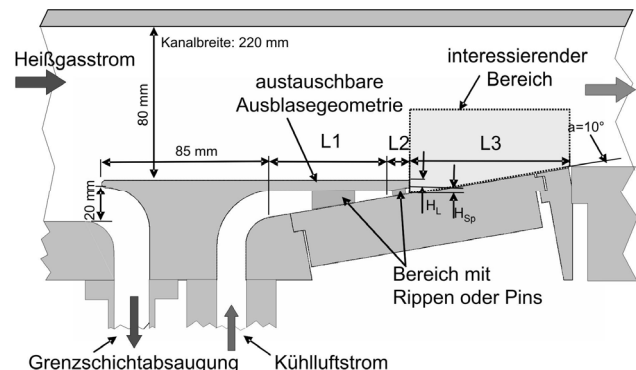


BILD 5. Aufbau der Messstrecke

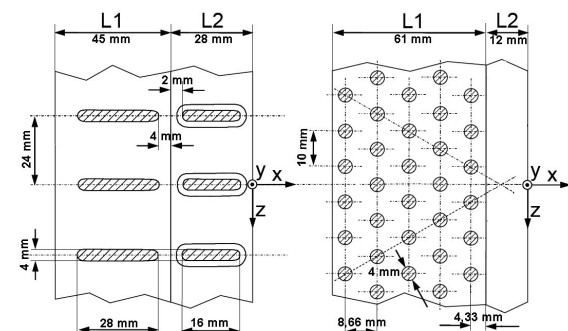


BILD 6. Skizze der Rippen- und Pin-Anordnung

Bei den Untersuchungen für diese Arbeit wurde eine Geometrie mit Pins und eine mit Rippen bei konstanter Lippendicke verwendet. Bild 6 zeigt die Anordnung und die Hauptabmessungen der beiden Varianten. An einer Kanalseitenwand und in der Kanaldecke sind optische Zugänge vorgesehen.

3.2. Betriebsbedingungen

Zur Bestimmung des Betriebspunktes ist in die Strömung eine vertikal und lateral traversierbare Pitot-Sonde eingebracht, mit der in der Heißgasströmung auf Höhe des Ausblasespaltes Totaldruck und Totaltemperatur erfasst werden. Der für die Bestimmung des dynamischen Druckes notwendige statische Druck wird durch eine Druckmessbohrung in der seitlichen Kanalwand gemessen. Zusammen mit den Daten eines Heißfilm-Massenstromsensors (HFM) im Kühlluftkanal und der Kühllufttemperatur kann so der aktuelle Betriebspunkt ermittelt werden. Es wurden verschiedene Ausblaseraten von $M=0,2$ bis $M=1,4$ eingestellt. Die Ausblaserate wurde dabei nach Gleichung (1) aus dem Kühlluftmassenstrom m_c , der Kühlluftaustrittsfläche A , dem statischen Druck p_{st} , der statischen Temperatur T_{st} , dem Isentropenexponent $\kappa=1,4$, der Gaskonstanten R und der Machzahl Ma gebildet.

$$(1) \quad M = \frac{m_c}{A \cdot p_{st} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R \cdot T_{st}}} \cdot Ma}$$

Wenn nicht anders angegeben, wurden die Messungen bei 500 K Heißgastemperatur durchgeführt. Mit der Kühllufttemperatur von ca. 295 K resultiert daraus ein Dichteverhältnis von ca. 1,5. Damit ist ein realitätsnahes Impulsverhältnis der beiden Ströme gewährleistet. Für die Heißgasströmung wurde eine konstante und für reale Maschinen typische Reynoldszahl von $Re=250.000$ eingestellt. Die Reynoldszahl wird hierbei mit der Freistromgeschwindigkeit der Heißgasströmung an der Ausblasestelle ($u_{hg} \approx 57$ m/s) und der Länge der anlaufenden Grenzschicht vor der Ausblasung (konstant 158 mm) als charakteristischer Länge gebildet. Daraus ergibt sich an der Ausblasestelle eine maschinen-typische Grenzschichtdicke von etwa einer Spalthöhe (4 mm).

3.3. Modifikationen

Für die Mess- und Visualisierungsverfahren „Schlieren“ und „Background Oriented Schlieren“ ist die optische Zugänglichkeit von beiden Seiten des Kanals notwendig. Daher wurde bei diesen Verfahren die Pitot-Sonde weiter stromauf platziert und die Kanalrückwand ebenfalls durch einen optischen Zugang ersetzt.

Für die Particle Image Velocimetry (PIV) mussten Partikel auch in die Heißgasströmung eingebracht werden. Dazu wurde ein spezielles Turbulenzgitter verwendet. Dessen mittlere, senkrechte Strebe innen hohl ist und über die gesamte Höhe mit kleinen Bohrungen versehen ist, aus denen die mit Partikeln beladene Luft aus dem Partikelgenerator austreten kann. Damit die Öl-Partikel nicht verdampfen, wurde für die PIV Messungen die Heißgastemperatur auf 400 K reduziert. Um die Reynoldszahl konstant zu halten wurde darum auch die Geschwindigkeit u_{hg} auf ca. 40 m/s reduziert.

4. OPTISCHE MESSTECHNIKEN UND STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messtechniken und Visualisierungsverfahren erläutert.

4.1. Visualisierung mit Partikeln

Da die betrachtete Strömung aus den zwei Komponenten Heißgas und Kühlluft besteht, kann die Ausmischung der beiden Ströme durch Einbringen von Partikeln in einen Teilstrom dargestellt werden. Durch Belichten der Partikel mit einem geeigneten Blitzlicht kann der Bereich dargestellt werden, in den die eine Strömung gelangt. Alternativ dazu kann auch mit einem Laserlichtschnitt nur eine Ebene der Strömung belichtet werden.

Beim Einbringen der Partikel in die Strömung ist die gleichmäßige Verteilung über den belichteten Bereich wichtig. Die Partikelgröße ist entscheidend für das Folgevermögen der Partikel mit der Strömung. Es kann nicht die Strömung selbst beobachtet werden, sondern nur die Teilchen in der Strömung. Das Folgeverhalten, insbesondere bei kleinskaligen Wirbelstrukturen, beeinflusst also direkt das Ergebnis. Da flüssige Partikel zum Einsatz kamen, wurden sie in die kalte Luft eingebracht, da so die Verdampfung minimiert wurde. Im vorliegenden Fall wurde ein Flüssigkeitszerstäuber verwendet, der DEHS (Diethylhexylsebakat) Öl zerstäubt. Für die PIV Messungen müssen die Partikel auch in die Heißgasströmung gebracht werden. Für diese Messungen wurde die Temperatur auf 400 K und die Strömungsgeschwindigkeit auf ca. 40 m/s reduziert. Die Verdampfung der Partikel über die Aufenthaltsdauer im Messbereich ist dann gering.

Die Anzahl der Partikel war über alle Betriebspunkte mit verschiedenen Ausblaseraten nahezu konstant. Durch die unterschiedliche Luftmenge, in die die Teilchen eingeblasen wurden, änderte sich die Partikeldichte dagegen deutlich mit der Ausblaserate. Ebenso änderte sich der Wärmeeintrag in die Kühlluft in den Bereichen L1 und L2 der Ausblasung je nach Strömungsgeschwindigkeit. Damit änderte sich auch die Verdampfungsrate der Partikel. Es können also keine Schlussfolgerungen aus der Partikeldichte gezogen werden. Bild 7 zeigt schematisch die Anordnung der Kamera und des Blitzes am Kanal. Eine Digitalkamera triggert ein Stroboskop, mit dem eine Belichtungszeit von unter 40 μ s realisiert werden kann.

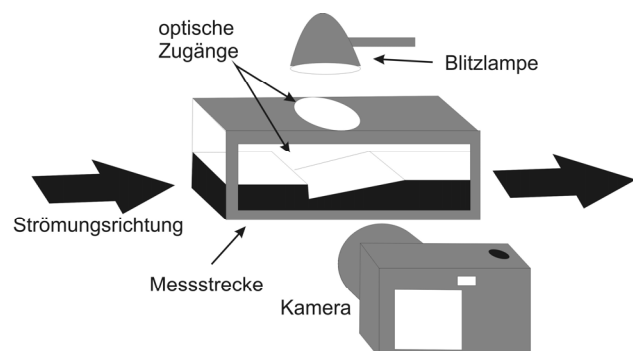


BILD 7. Anordnung der Messeinrichtung für die Visualisierung mit Partikeln

Dies entspricht ca. 1/10 der erwarteten Periodendauer der Wirbelablösung. Die Kameraparameter wurden variiert, um die Aufnahmen zu optimieren. Um Einflüsse des Kanalbildes zu reduzieren wurde mit Bildverarbeitungssoftware ein Hintergrundbild ohne Partikel von den Aufnahmen mit Partikeln abgezogen.

Die Durchführung bei der Belichtung mit Hilfe des Laserschnittes entspricht der Vorgehensweise bei den PIV-Messungen. Die Beschreibung erfolgt daher erst in diesem Abschnitt.

4.2. Schlierenverfahren

Mit dem Schlierenverfahren können Dichtegradienten in durchsichtigen Medien dargestellt werden. Dieses Verfahren wird häufig bei transsonischen Strömungen verwendet, um Verdichtungsstöße zu visualisieren. Grundlage dieses rein optischen Verfahrens ist die Lichtbrechung an einem Dichtegradienten, hervorgerufen durch die Änderung des Brechungsindex n , der abhängig von der Dichte ρ ist.

Bild 8 zeigt einen vereinfachten Aufbau, bei dem von einer Punktlichtquelle ausgegangen wird. Das System kann mit Linsen oder Parabolspiegeln aufgebaut werden. Zur einfacheren Darstellung in einer Achse wird hier der Linsenaufbau bevorzugt. Bei der Durchführung der Experimente wurden Spiegel verwendet. Die Lichtquelle wird im Brennpunkt der ersten Linse positioniert. Dadurch wird sichergestellt, dass rein paralleles Licht aus der Linse austritt. Nachdem das Licht den Messbereich passiert hat, trifft es auf eine weitere Linse, die das parallele Licht wieder auf einen Brennpunkt fokussiert. An diesem Punkt wird eine scharfe Kante, beispielsweise eine Messerschneide oder eine Rasierklinge, in den Strahlengang gebracht. Anschließend wird das Bild auf einem Schirm oder mit einer Kamera abgebildet. Werden im Messbereich Strahlen durch einen Dichteunterschied abgelenkt, treffen sie nicht mehr als paralleles Licht auf die zweite Linse. Folglich werden sie durch die zweite Linse nicht mehr genau in deren Brennpunkt gebrochen. Der Teil, der auf der Seite der scharfen Kante am Brennpunkt vorbei geht, wird durch diese ausgeblendet. Auf dem Bild entstehen dunkle Bereiche, die den Dichteunterschied aufzeigen. Wird an Stelle einer Punktlichtquelle eine erweiterte Lichtquelle, beispielsweise ein Lichtspalt verwendet, so kann diese als Ansammlung aneinander gereihter Punktlichtquellen aufgefasst werden. Je mehr dieser Punktlichtquellen abgelenkt werden, desto dunkler wird der Bildbereich. Daraus resultiert ein Graustufenbild, das den Betrag des Dichtegradienten wiedergibt. Die Belichtungszeit der verwendeten Kamera wird mit ca. 100 μs abgeschätzt. Diese verhältnismäßig lange Zeit reicht nicht aus, um die Ablösewirbel zeitlich aufzulösen, wohl aber, um festzustellen, ob das Verfahren für die Darstellung des Kühlfilms geeignet ist.

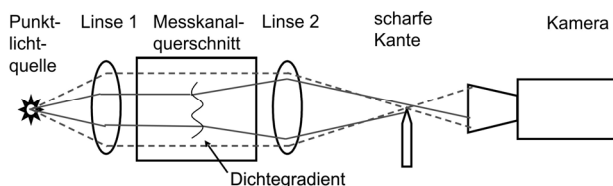


BILD 8. Skizze eines Schlierenaufbaus mit Punktlichtquelle

Um die Wirbel darstellen zu können, muss eine kürzere Belichtungszeit der Kamera oder ein Blitzlicht verwendet werden.

4.3. Background Oriented Schlieren (BOS)

Das Hintergrund-Schlierenverfahren, oder auch Background Oriented Schlieren (BOS) genannt, ist eine Weiterentwicklung der Schlierenvisualisierung. Es zeichnet sich gegenüber dem Schlierenverfahren durch einen wesentlich einfacheren Aufbau aus. Der messtechnische Aufbau besteht lediglich aus einer Kamera und einem unregelmäßigen, beleuchteten Hintergrund. Das Schlierenobjekt wird, wie Bild 9 zeigt, zwischen der Kamera und dem beleuchteten Hintergrund angeordnet. Die Messung beruht, wie beim herkömmlichen Schlierenverfahren, auf der Ablenkung der Lichtstrahlen an einem Dichtegradienten. Dabei werden je ein Referenzbild ohne Schlieren im Strahlengang und ein Bild mit Schlieren aufgenommen. Aus der verschobenen Darstellung des Hintergrundbildes kann die Strahlablenkung bestimmt werden und damit auf den Dichtegradienten geschlossen werden. Allerdings wird, wie auch schon beim Schlierenverfahren, die gesamte Breite des Strömungskanals betrachtet. Es findet also eine Mittelung über die Kanalbreite statt. Die Fähigkeit zur Momentaufnahme definiert sich über die verwendete Kamera oder über die Belichtungszeit des Hintergrundes. Im vorliegenden Fall wurde der Hintergrund mit einem Blitzlicht für ca. 35 μs belichtet. Der Hintergrund muss ein unregelmäßiges Bild sein, damit eine Verschiebung auch detektiert werden kann. Bei einem regelmäßigen Bild, wie einem Punkt- oder Kreuzmuster, können die Verschiebungen nicht eindeutig zugeordnet werden oder werden überhaupt nicht erkannt. Am einfachsten ist die Verwendung eines zufälligen Punktemusters.

Der Auswertalgorithmus entspricht dem des PIV Verfahrens und wird daher im nächsten Abschnitt beschrieben. Das Bild ohne Schlieren und das zweite Bild mit Schlieren werden mit einer Kreuzkorrelation verknüpft. Das daraus entstehende Vektorfeld gibt die Dichtegradienten in der betrachteten Ebene an.

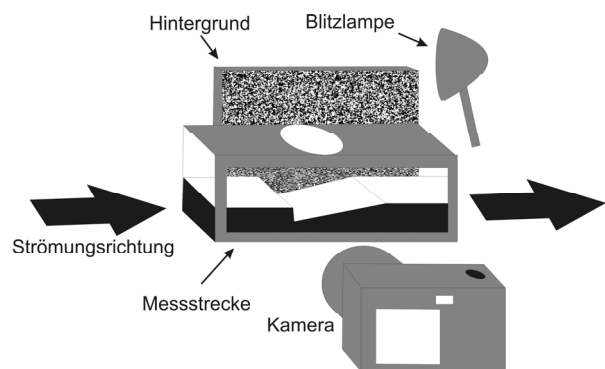


BILD 9. Versuchsanordnung des „Background Oriented Schlieren“ Verfahrens

4.4. Particle Image Velocimetry (PIV)

PIV ist eine optische Messtechnik zur Strömungsgeschwindigkeitsbestimmung. Dazu werden in die Strömung Partikel eingebracht, die klein genug sind, um der Strömung auch bei schnellen Änderungen der Geschwindigkeit in Betrag oder Richtung folgen zu

können. Wie in Bild 10 dargestellt, werden über optische Zugänge im Strömungskanal ein Laser-Lichtschnitt eingebracht und mit einer speziellen Kamera die so belichteten Partikel zweimal in kurzem zeitlichen Abstand fotografiert. Über eine Korrelationsfunktion werden die Partikelverschiebungen in Beziehung gesetzt und aus der Zeit zwischen den beiden Belichtungen und der zurückgelegten Wegstrecke wird die lokale Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung bestimmt.

Mit PIV ist eine quantitative Vektor-Bestimmung gleichzeitig an vielen Orten möglich und es kann ein breites Spektrum an Geschwindigkeiten erfasst werden. Deshalb eignet sie sich besonders um turbulente Strukturen zu charakterisieren.

Um gezielt eine Ebene in der Strömung zu beleuchten, ist es wichtig, einen wenig streuenden Lichtstrahl zur Verfügung zu haben, der mit Hilfe von Linsen zu einer dünnen Ebene, dem Lichtschnitt, aufgespannt werden kann. Dieser sollte eine möglichst homogene Lichtintensität aufweisen, um an allen Orten der Messung eine vergleichbare Belichtungsstärke bereitzustellen. Die Belichtungszeiten müssen sehr kurz gehalten werden, um scharfe Bilder zu erhalten. Des Weiteren sind die Partikel aufgrund des geforderten Folgevermögens sehr klein. Die daraus resultierende Forderung nach sehr hoher Lichtintensität macht den Einsatz eines Lasers erforderlich. Das verwendete System aus Kamera und Laser kann einen minimalen zeitlichen Abstand der beiden Bilder von 1 μ s realisieren. Die Laserpulsdauer beträgt 15 ns. Die Belichtungszeit ist somit um einige Größenordnungen unter der erwarteten Periodendauer der Wirbelablösungen und kann diese daher zeitlich aufgelöst darstellen. Die verwendete Kamera ist mit einem speziellen CCD Chip ausgestattet, bei dem jeder Pixel aus einem lichtempfindlichen Bereich und aus einem Speicherbereich besteht. Dadurch wird die Aufnahme von zwei Bildern direkt hintereinander ermöglicht, ohne dass erst der Speicher ausgelesen werden muss.

Bei PIV wird die Intensitätsverteilung der beiden Aufnahmen ausgewertet. Dazu wird die beobachtete Fläche in kleine Bereiche, so genannte Interrogation Spots, aufgeteilt. Die Intensitätsfunktion jedes Spots des Ursprungsbildes wird mit dem so genannten Kreuz-Korrelationsverfahren mit dem zweiten Bild verknüpft. Jedem dieser Spots wird somit ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet.

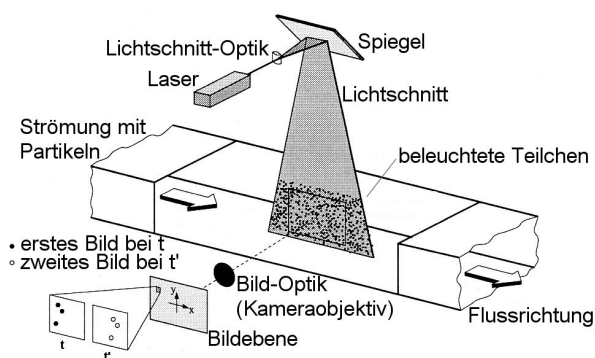


BILD 10. Skizze des Grundaufbaus einer PIV Anordnung [18]

5. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Resultate der angewendeten Visualisierungs- und Messverfahren vorgestellt, sowie deren Qualität und Aussagekraft diskutiert.

5.1. Visualisierung mit Partikeln

Bild 11 zeigt exemplarisch eine Aufnahme, bei der die Partikel mit einem Blitzlicht belichtet wurden. Auf einzelnen Bildern dieser Messreihen sind an der Scherschicht zum Heißgas instationäre, turbulente Wellenformen zu sehen. Auf dem Foto (Bild 11) ist der Abstand zweier Wellen markiert. Diese Wellenstrukturen haben eine Ausdehnung von ca. $x = 6-8$ mm. Als Längen-Referenz kann die gut sichtbare Höhe der Ausblaselippe, also Ausblasespalthöhe und Ausblaselippendicke, von hier 8 mm herangezogen werden. Aufgrund der ungleichmäßigen Ausleuchtung durch die Blitzlampe, sind Schlüsse aus der Verteilung der Partikeldichte auf den Bildern sehr kritisch zu betrachten. Da bei dieser Aufnahmetechnik die gesamte Kanalbreite von oben beleuchtet wurde sind die Aufnahmen als eine ungleichmäßige laterale Integration zu sehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zwar ansatzweise in Einzelaufnahmen erkennbare Merkmale der instationären Ablösung an der Ausblaselippe auftreten, diese aber relativ unscharf abgebildet werden. Zum einen ist das darauf zurückzuführen, dass sich die belichteten Partikel über einen breiteren Bereich erstrecken als die eingestellte Tiefenschärfe der Kamera. Zum anderen zeigen die Bilder das Streulicht der Partikel in einem durch die Ausleuchtungsmethode ungenau definierten Volumen. Qualitative Aussagen über die Intensitätsverteilungen der Bilder sind deshalb nur sehr eingeschränkt möglich.

Durch eine lokale Ausleuchtung, beispielsweise mittels Laserlichtschnitt, können diese Probleme umgangen werden. Die Verwendung eines Laserblitzes als Belichtung ermöglicht zudem wesentlich kürzere Belichtungszeiten. In Bild 12 sind Visualisierungen mit einem Laserlichtschnitt bei verschiedenen Ausblaseraten dargestellt. Die Skala in x-Richtung ist auf die Spalthöhe H_{sp} bezogen und somit dimensionslos dargestellt. Bei der Interpretation der Bilder muss berücksichtigt werden, dass es sich um Momentaufnahmen handelt. Die Betrachtung einzelner Bilder lässt daher nur begrenzt Aussagen über allgemeine Tendenzen der Wirbelablösung oder der Ausmischung des Kühlfilms zu. Ebenso treten Schwankungen der Intensitäten durch eine unterschiedliche Partikeldichte auf. Auch in diesen Bildern beträgt der Wirbelabstand ca. 8 mm, wie dies auch bei der Belichtung mit Blitzlicht erkennbar ist. Da in diesem Fall nur eine Ebene beleuchtet wird, bestätigt dies die These, dass die beobachteten Strukturen von den instationären Ablösungen an der Lippe stammen.

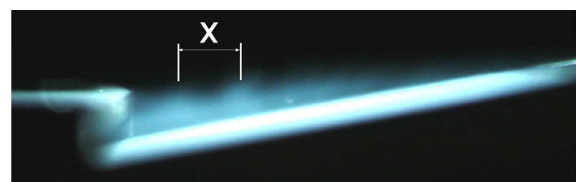


BILD 11. Einzelne Fotografie mit Wirbelstruktur

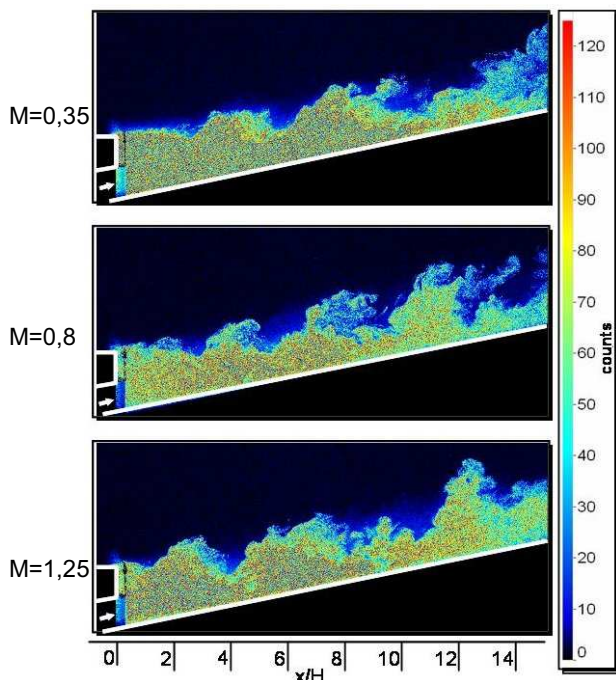


BILD 12. Visualisierung mit dem PIV Aufbau (Rippengeometrie, Ebene A)

Mit dieser Visualisierung können die instationären, kohärenten Ablösevorgänge visualisiert werden. Gleichzeitig sieht man Bereiche, in denen die Partikel, ausgehend von dieser Struktur, weiter ausgemischt werden. Hieran sind Überlagerungen durch turbulente Strömungsphänomene zu sehen.

5.2. Schlierenaufnahmen

Bild 13 zeigt die Resultate der Schlierenaufnahmen mit der Rippengeometrie. Je höher die Dichtegradienten sind, desto dunkler ist das Bild an dieser Stelle. Da der parallele Strahlengang durch den gesamten Kanal verläuft, liegt hier eine Integration über die gesamte Breite vor. Bei der eingestellten Belichtungsdauer von etwa 100 μ s, was etwa einem Viertel einer Ablöseperiode entspricht, sind nur sehr eingeschränkt zeitlich aufgelöste Bilder zu erwarten.

Sehr deutlich ist die zunehmende Dicke des Mischgebietes mit zunehmender Ausblaserate zu erkennen. Auffällig ist das dunkle Gebiet direkt am Ausblasespalt. Dieses ist bei steigender Ausblaserate immer ausgeprägter.

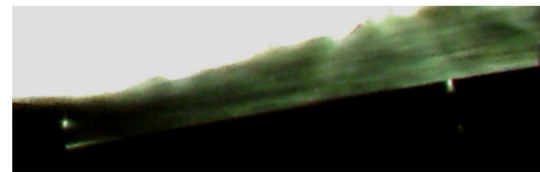
Da direkt am Austritt die Kühlluft noch nicht mit dem Heißgas vermischt sein kann, ist hier ein helles Gebiet mit geringem Dichtegradienten zu erwarten. Das Strömungsbild der Ausblasung ist hier möglicherweise durch dreidimensionale Effekte am Kanalrand überlagert. Der Ausblasespalt erstreckt sich aus konstruktiven Gründen nicht über die gesamte Kanalbreite. Dadurch entsteht an beiden Seiten des Heißgaskanals jeweils ein 20 mm breites Randgebiet ohne Kühlluftausblasung. Die Strömung erhält besonders am Rand des Kanals einen verstärkten dreidimensionalen Charakter. Bei weiteren Parameterstudien mit diesem Verfahren sollte daher die Kanalkonstruktion als rein zweidimensionales Profil aufgebaut sein.



M= 0,35



M= 0,80



M= 1,25

BILD 13. Schlierenaufnahmen mit der Rippengeometrie bei verschiedenen Ausblaseraten M

Die Dichtegradienten in dieser Strömung konnten erfolgreich visualisiert werden. Die Strömung kann als inkompressibel betrachtet werden. Die dargestellten Dichtegradienten geben somit die Temperaturgradienten im Kühlfilm wieder. Die erfolgreiche Visualisierung lässt darauf schließen, auch mit dem Messverfahren BOS aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, da dieses ebenfalls auf der Strahlablenkung an Dichtegradienten beruht.

5.3. BOS

Bei den hier präsentierten Bildern handelt es sich um Momentaufnahmen. Ob die beobachteten Strömungsphänomene also nur vorübergehend auftreten oder einen dauerhaften Zustand wiedergeben, kann daraus nicht abgeleitet werden. Alle BOS Vektorfelder geben zunächst nur die Verschiebung des Hintergrundbildes an. Da auch der Strahlengang dieses Verfahrens durch den gesamten Kanal geht, entsprechen die Ergebnisse wiederum einem über die Kanalbreite integrierten Wert. Die Veränderungen über die untersuchte Bandbreite von Ausblaseraten sind in Bild 14 zu sehen. Für eine bessere Darstellung wurde hier auf die Anzeige der Vektoren verzichtet und nur die der Vektorlänge entsprechende Farbhinterlegung abgebildet. Mit zunehmender Ausblaserate ist eine signifikante Vergrößerung des Gebietes in x-Richtung, in der noch Dichtegradienten sichtbar sind, zu beobachten.

Bei thermografischen Untersuchungen von Martini et al. [1] wurde bei einer Ausblaserate von $M=0,8$ ein Maximum der Wandtemperaturen festgestellt. Dafür wurde eine bei dieser Ausblaserate besonders ausgeprägte Ablöseturbulenz verantwortlich gemacht. Damit übereinstimmend ist in Bild 14 bei $M=0,8$ eine deutlich ausgeprägte Wellenstruktur erkennbar. Aufgrund des Messprinzips ist anzunehmen, dass es sich um eine kohärente, in lateraler Ausdehnung nahezu gleichförmige Struktur handelt.

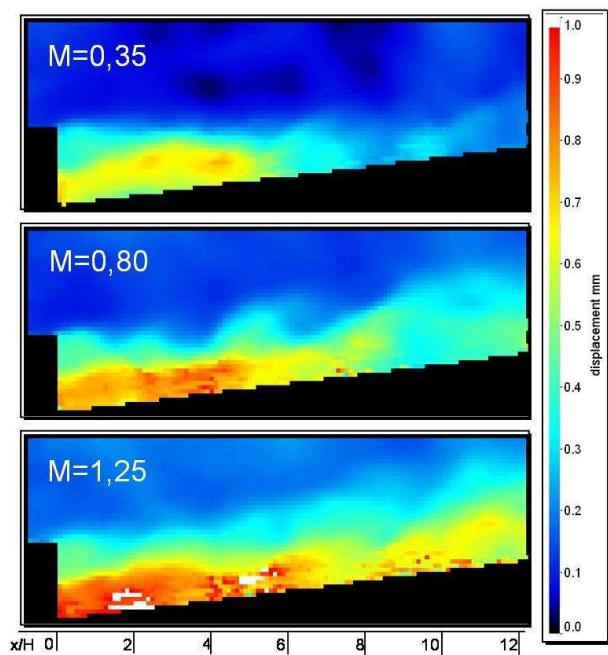


BILD 14. BOS Messung bei variierender Ausblaserate

Des Weiteren kann beobachtet werden, dass der Dichtegradient im Nahbereich des Ausblasespaltes zur Wand hin immer größer wird. Hier stellt sich wieder die Frage, ob dies tatsächlich der Kaltluftströmung zuzuordnen ist oder ob hier wiederum die Randbereiche des Kanals die restliche Beobachtung überdecken. Aus Temperaturmessungen mittels einer traversierbaren Sonde am Ausblasespalt geht hervor, dass die Temperaturverteilung über der Spalthöhe verhältnismäßig konstant ist. Die Kühlluft ist am Austritt nahezu isotherm. Demnach wären unmittelbar stromab des Ausblasespaltes sehr geringe Dichtegradienten zu erwarten. Auch hier könnte eine Versuchsreihe mit einer Konstruktion ohne Randbereiche Klarheit schaffen.

Der genaue Ort der Strahlablenkung innerhalb des Kanals ist nicht bekannt. Um von der Verschiebung des Hintergrundbildes auf den Ablenkungswinkel der Strahlen und damit auf den Dichtegradienten schließen zu können, muss der Ort der Ablenkung abgeschätzt werden. Mit einer bekannten Randbedingung lässt sich durch Integration der Dichtegradientenverteilung die Dichteverteilung bestimmen. Die Temperaturverteilung sollte durch diese Dichteverteilung wiedergegeben werden, da Dichteänderungen hier nur sehr geringfügig von Druckänderungen herrühren. Dies sind weitere Schritte, mit denen schließlich quantitative Ergebnisse erreicht werden, die die Aussagekraft der Ergebnisse dieses recht neuen Verfahrens untermauern können. Das BOS Verfahren ist bei Beachtung der oben genannten konstruktiven Anforderung geeignet, um den vorliegenden Strömungsfall zu untersuchen.

5.4. PIV

In Bild 15 wurde wieder auf die Darstellung der Vektoren verzichtet und nur die Farbe entsprechend ihrer Länge abgebildet, um eine anschaulichere Darstellung zu erreichen. Abgebildet sind Verteilungen der absoluten Geschwindigkeit bei Verwendung der Rippengeometrie über den Bereich der eingestellten Ausblaseraten. Die Bilder zeigen Mittelwerte über 200 Einzelauswertungen. Es wurden Messungen in verschiedenen parallelen Ebenen durchgeführt. In Bild 15 sind die Ergebnisse der Messung in einer Ebene im direkten Nachlauf der Rippen (Ebene A) den Ergebnissen einer Messung in einer Ebene zwischen zwei Rippen (Ebene B) gegenüber gestellt. Wie erwartet, nimmt die Geschwindigkeit direkt am Ausblasespalt mit steigender Ausblaserate zu. Hinter der Ausblaselippe bildet sich ein Gebiet mit sehr geringen Geschwindigkeiten aus. Beim Vergleich der Ebenen zeigt sich zwischen den Rippen (Ebene B) eine deutlich höhere Geschwindigkeit am Ausblasespalt als dies direkt hinter einer Rippe der Fall ist (Ebene A). Die Turbulatoren im Kühlkanal beeinflussen die Strömung nach der Ausblasung durch ihr Nachlaufgebiet.

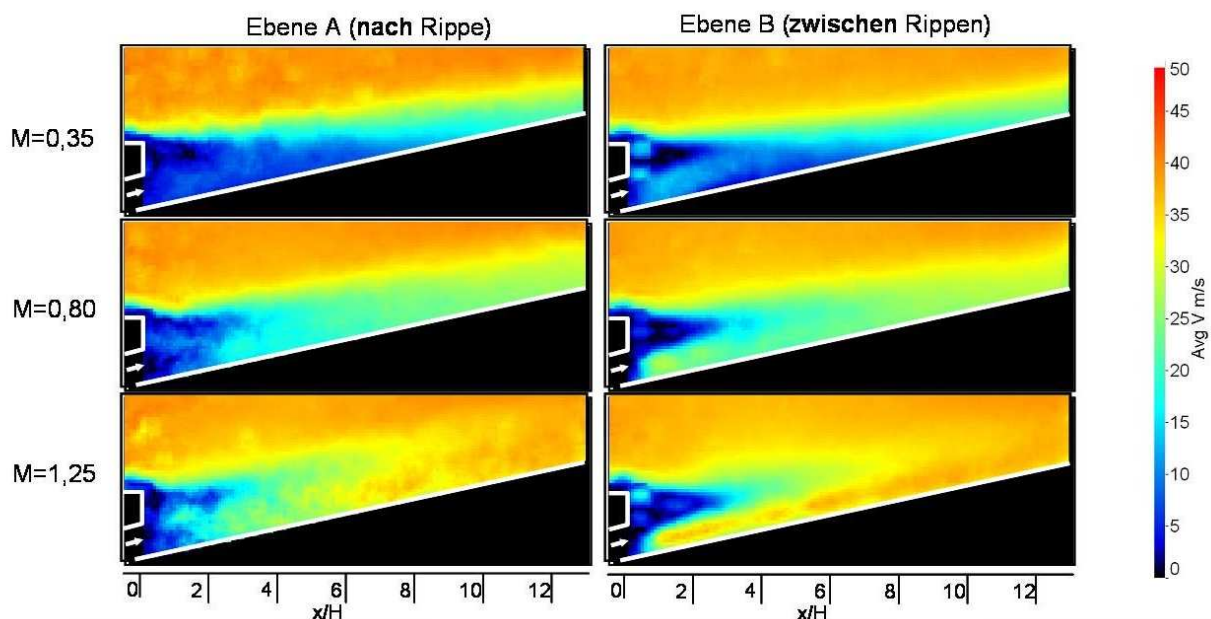


BILD 15. Geschwindigkeitsverteilungen mit der Rippengeometrie in zwei Ebenen bei verschiedenen Ausblaseraten M

Dieses verlangsamt die Strömung im Gebiet hinter der Rippe. Martini et al. [1] haben bei der Messung von Filmkühleffektivitäten im Nachlauf von Rippen eine verbesserte Kühlung als zwischen den Rippen festgestellt. Die Schlussfolgerung war, dass die Ablösung an der Lippe durch den Nachlauf der Rippen abgeschwächt wird und somit eine geringere Ausmischung des Kühlfilms durch die Ablösewirbel auftritt. Die hier auftretenden erhöhten Geschwindigkeiten könnten von der Ablösung an der Lippe stammen, die durch die Abschwächung durch die Rippen in Ebene A nicht mehr sichtbar sind. Im oberen Bildbereich ist die Heißgasströmung unbeeinflusst von der Kühlluftausblasung. Trotzdem zeigen diese Gebiete keine vollständig homogene Geschwindigkeit. Die Schwankungen aus den Einzelaufnahmen sind also noch nicht vollständig herausgemittelt worden. 200 Bilder sind demnach zu wenig für eine vollständige statistische Erfassung des vorliegenden Strömungsfeldes.

Für eine bessere Vergleichbarkeit besteht die Möglichkeit die Beträge der einzelnen Vektoren in x- und y-Richtung auszugeben. Die Geschwindigkeitsprofile bei der Ausblaserate $M=0,80$ über die dimensionslose Höhe y/H über dem Kanalboden sind in Bild 16 für die Stelle $x/H=2$ und in Bild 17 für die Stelle $x/H=6$ dargestellt. Aufgetragen ist die Geschwindigkeitskomponente u in x-Richtung. Zur dimensionslosen Darstellung wurde die lokale Geschwindigkeit auf die eingestellte Heißgas- Strömungs-

geschwindigkeit von 40 m/s bezogen. An der Stelle $x/H=2$ (Bild 16) ist besonders in der Ebene B eine hohe Ausblasegeschwindigkeit und ein sehr deutlicher Einbruch der Geschwindigkeit in Höhe der Ausblaselippe zu erkennen. In Ebene A ist dieser Einbruch auch zu beobachten. Die Geschwindigkeit in Höhe der Lippe ist hier allerdings größer. Der Impulsverlust an der Ausblaselippe ist im Nachlauf der Rippe also vermindert. Die Grenzschicht zur Kanalwand, also die Haftbedingung an der Wand, kann, aufgrund der Diskretisierung der Messung durch die Einteilung in Interrogation Spots, nicht aufgelöst werden. Weiter stromab an der Stelle $x/H=6$ (Bild 17) ist in Ebene A die Geschwindigkeit an der Kanalunterseite immer noch geringer als in Ebene B. Eine Verminderung der Geschwindigkeit im Nachlauf der Ausblaselippe ist allerdings nicht mehr zu sehen. Anders bei den Geschwindigkeiten der Ebene B. Hier tritt dieses Bild immer noch auf, wenn auch wesentlich schwächer ausgeprägt als zuvor.

Mit den PIV Messungen ist es gelungen Unterschiede im Nachlauf der Turbulatoren herauszustellen. In den Geschwindigkeitsprofilen ist eine Beeinflussung des Turbulatornachlaufs auf die Ablösung an der Ausblaselippe erkennbar.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine besondere Herausforderung bei der Filmkühlung von Turbinenschaufeln stellt die Kühlung der dünnen Hinterkante dar. Dazu wurde in dieser Arbeit der Nahbereich nach einer Spaltausblasung an einer zurückgeschnittenen Turbinenschaufelhinterkante untersucht. Es wurden Geometrien mit Rippen und Pins im Ausblasespalt untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war es, geeignete Visualisierungsverfahren bzw. optische Messverfahren zu finden, um Aufschluss über die Strömung im Nachlauf der Kühlluftausblasung zu gewinnen. Der Kenntnisstand über die Strömung nach der Kühlluftausblasung konnte erweitert werden, so dass nun die Grundlagen für weitere Optimierungen der Ausblasegeometrie gegeben sind.

Es wurden vier verschiedene Verfahren angewandt: Visualisierung mit Partikeln und das Schlierenverfahren als reine Visualisierungen, sowie Background Oriented Schlieren (BOS) und Particle Image Velocimetry (PIV) als optische Messverfahren zur Dichtegradientenbestimmung bzw. zur Geschwindigkeitsmessung.

Zunächst wurde die Strömung durch Einbringen von Partikeln beobachtet. Durch die Art der Beleuchtung und die langen Belichtungszeiten waren mittels dieser Methode nur wenig aussagekräftige Bilder zu bekommen. Durch die Ausleuchtung des Strömungsfeldes mittels Laserlichtschnitt sind die Visualisierungen der instationären Ablösungen möglich. Sie werden scharf abgebildet und zeigen zudem noch Überlagerungen turbulenter Strukturen. Der große Vorteil dieses Systems ist die Beleuchtung nur einer Ebene im Kanal und eine sehr kurze Belichtungszeit.

Aufgrund des inkompressiblen Charakters der untersuchten Strömung kann das Schlierenverfahren dazu verwendet werden, Dichtegradienten darzustellen, die durch die unterschiedlichen Temperaturen von Kühlluft und Heißgas verursacht werden. Im vorliegenden Fall konnte damit der Temperaturgradient im Kühlfilm sichtbar

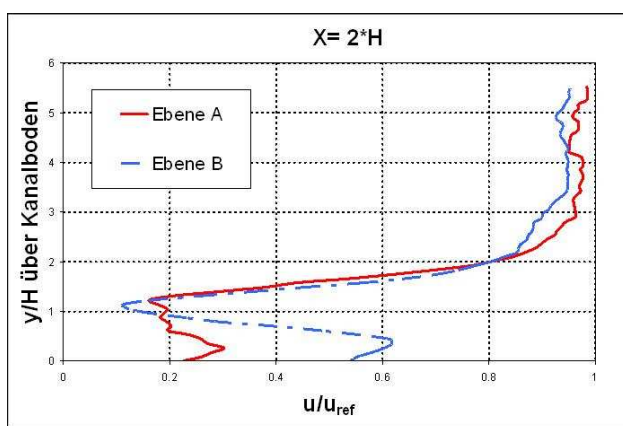


BILD 16. Geschwindigkeitsprofile an der Stelle $x/H=2$ bei der Rippengeometrie ($M=0,8$)

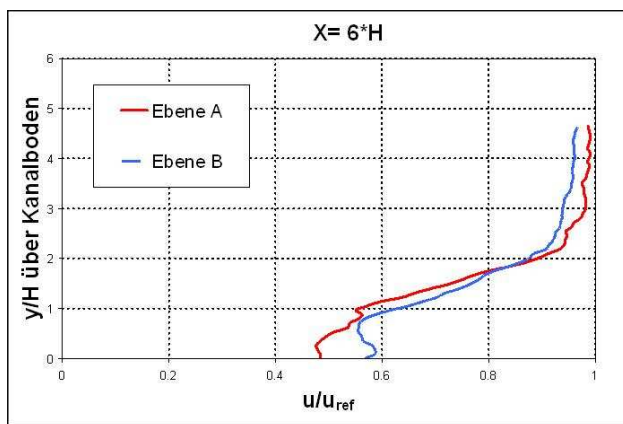


BILD 17. Geschwindigkeitsprofile an der Stelle $x/H=6$ bei der Rippengeometrie ($M=0,8$)

gemacht werden. Bei der Auswertung der Bilder ist zu beachten, dass der Strahlengang durch die gesamte Kanalbreite geht. Dreidimensionale Strukturen in der Strömung, können dadurch vom Schlierenverfahren nicht abgebildet werden. Für nachfolgende Untersuchungen unter Anwendung des Schlierenverfahrens empfiehlt es sich daher, die Kanalkonstruktion als rein zweidimensionales Profil mit geringer Kanalbreite aufzubauen.

Die Weiterentwicklung des Schlierenverfahrens zu einem quantitativen Messverfahren, dem Background Oriented Schlieren Verfahren (BOS), lässt eine lokale Quantifizierung der Dichtegradienten zu. Für den untersuchten Strömungsfall konnten deutliche Veränderungen des Verschiebungsfeldes bei verschiedenen Ausblaseraten gemessen werden. Das Verschiebungsfeld kann mit geeigneten Auswerteroutinen in ein Dichtegradientenfeld und daraus in eine Temperaturverteilung überführt werden.

Mit Hilfe der PIV konnten Einflüsse interner Turbulatoren auf das Strömungsfeld stromab der Ausblasung sichtbar gemacht werden. Für die Auswertung ist die Mittelung über mehrere Aufnahmen erforderlich, da die geringe Partikeldichte und das stark fluktuierende Strömungsfeld die Auswertung einzelner Bilder erheblich erschwert. Zuverlässige, zeitlich aufgelöste Momentaufnahmen des Geschwindigkeitsfeldes waren daher nicht möglich. Die statistische Auswertung von 200 Bildern zeigte dagegen zuverlässige Ergebnisse, da einzelne Fehlvektoren hier durch gültige Messungen überlagert werden. Um die kohärenten Ablösewirbel trotz einer Mittelung mittels PIV aufzulösen, ist die phasenaufgelöste Triggerung der Aufnahmen denkbar. Für das Triggersignal könnte beispielsweise ein Hitzdrahtanemometer im Nachlauf der Ausblaselippe verwendet werden. Um den lateralen Aufbau und den Einfluss der internen Turbulatoren genauer zu untersuchen, könnte in weiteren Untersuchungen die Beobachtungsebene parallel zur gekühlten Wand gewählt werden. Eine Alternative dazu stellt die Erfassung der Geschwindigkeiten in drei Dimensionen mit Hilfe der Stereo-PIV dar [18].

Im Rahmen der Arbeit wurden prinzipielle Fragen über die Anwendbarkeit unterschiedlicher Messsysteme geklärt. Darauf aufbauend kann die Anwendung einzelner Systeme für die Untersuchung geometrischer Einflüsse auf die instationären Ablösungen erfolgen, um die auftretenden physikalischen Effekte zu identifizieren.

7. LITERATUR

- [1] Martini, P., Schulz, A. und Bauer, H.-J. (2006): Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer on the Trailing Edge Cut-Back of Gas Turbine Airfoils With Various Internal Cooling Designs. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 128, S. 196–205.
- [2] Martini, P., Schulz, A., Whitney, C. F. und Lutum, E. (2003): Experimental and Numerical Investigation of Trailing Edge Film Cooling Downstream of a Slot with Internal Rib Arrays. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Power and Energy*, Bd. 217, S. 393–401.
- [3] Martini, P. und Schulz, A. (2004): Experimental and Numerical Investigation of Trailing Edge Film Cooling by Circular Coolant Wall Jets Ejected From a Slot With Internal Rib Arrays. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 126, S. 229–236.
- [4] Martini, P., Schulz, A., Bauer, H.-J. und Whitney, C.F. (2006): Detached Eddy Simulation of Film Cooling Performance on the Trailing Edge Cutback of Gas Turbine Airfoils. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 128, S. 292–299.
- [5] Horbach, T., Martini, P., Schulz, A. und Bauer, H.-J. (2006): Numerische Untersuchung zur Filmkühlung von Turbinenschaufel-Hinterkanten unter Einsatz der Detached-Eddy Simulation. *DGLR-Jahrbuch 2006*, Bd. 1 und 2, Paper DGLR-2006-193.
- [6] Baldauf, Stefan (2001): Filmkühlung thermisch höchstbelasteter Oberflächen: Korrelationen thermographischer Messungen. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Thermische Strömungsmaschinen.
- [7] Sivasegaram, S. und Whitelaw, J. H. (1969): Film Cooling Slots: The Importance Of Lip Thickness And Injection Angle. *Journal Mechanical Engineering Science*, Bd. 11, S. 22–27.
- [8] Mukherjee, D. K. (1976): Film Cooling With Injection Through Slots. *Journal of Engineering for Power*, Bd. 7, S. 556–559.
- [9] Taslim, M. E., Spring, S. D. und Mehlman, B. P. (1992): Experimental Investigations of Film Cooling Effectiveness for Slots of Various Exit Geometries. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Bd. 6, S. 302–307.
- [10] Bittlinger, Gerd (1995): Filmkühlungen mit tangentialer Spaltausblasung: Experimentelle und numerische Ansätze zur Optimierung des Brennkammer-Luftbedarfs. Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Thermische Strömungsmaschinen.
- [11] Kapteijn, C., Amecke, J. und Michelassi, V. (1996): Aerodynamic Performance of a Transonic Turbine Guide Vane With Trailing Edge Coolant Ejection: Part I – Experimental Approach. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 118, S. 519–528.
- [12] Raffel, Markus und Kost, F. (1998): Investigation of aerodynamic effects of coolant ejection at the trailing edge of a turbine blade model by PIV and pressure measurements. *Experiments in Fluids*, Bd. 24, S. 447–461.
- [13] Martiny, M., Schulz, A. und Wittig, S. (1995): Full-Coverage Film Cooling Investigations: Adiabatic Wall Temperatures and Flow Visualization. *Techn. Ber. ASME Paper 95-WA/HT-4*, Universität Karlsruhe, Institut für Thermische Strömungsmaschinen.
- [14] Vogel, Dirk Thorsten (1996): Numerische Untersuchung des Mischungsverhaltens von Filmkühlstrahlen in Turboströmungen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.
- [15] Walters, D. K. und Leylek, J. H. (2000): A Detailed Analysis of Film-Cooling Physics: Part I – Streamwise Injection With Cylindrical Holes. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 122, S. 102–112.
- [16] Horbach, Tim (2005): Numerische Untersuchung zur Filmkühlung von Turbinenschaufel-Hinterkanten unter Einsatz der Detached-Eddy Simulation. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Institut für Thermische Strömungsmaschinen.
- [17] Roach, P. E. (1987): The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *International journal of heat and fluid flow*, Bd. 8, S. 82–92.
- [18] Raffel, Markus, Willert, C. E. und Kompenhans, J. (1998): Particle Image Velocimetry - A Practical Guide. Springer Verlag Berlin Heidelberg, DLR Göttingen.