

FILMKÜHLUNTERSUCHUNGEN IN INSTATIONÄRER STRÖMUNG MIT ABLÖSEBLASEN

M. Deinert
 Technische Universität Berlin
 ILR Luftfahrtantriebe
 Marchstraße 14, D-10587 Berlin

1. ÜBERSICHT

Gegenstand der Arbeit ist die Untersuchung der Filmkühlung an einer ebenen Platte mit aufgeprägter, turbomaschinenähnlicher Druckverteilung in einem stationären und periodisch instationären Strömungsfeld. Die aufgeprägte Druckverteilung mit einem stark positiven Druckgradienten verursacht eine Ablöseblase an der Plattenoberfläche. Ziel der Untersuchung ist die Beschreibung ihrer aerodynamischen und aerothermodynamischen Wechselwirkung mit dem filmgekühlten Strömungsfeld und die Auswirkungen auf die Kühlung.

2. DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich noch einmal meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. J. Hourmouziadis für seine Unterstützung als hilfsbereiter Ansprechpartner bei fachlichen Problemen danken. Er hat es bestens verstanden, Lösungen in einem selbst zu wecken.

3. NOMENKLATUR

Am	[-]	Amplitudenverhältnis
c_D	[-]	Durchflusskoeffizient
D	[m]	Bohrungsdurchmesser
I_{av}	[-]	Impulsrate mit der gemittelten Kühlgeschwindigkeit gebildet
I_{korr}	[-]	Impulsrate mit der gemittelten Kühlgeschwindigkeit im stromab Bereich
M_{av}	[-]	Ausblaserate mit der gemittelten Kühlgeschwindigkeit gebildet
M_{korr}	[-]	Ausblaserate mit der gemittelten Kühlgeschwindigkeit im stromab Bereich
P	[s]	Periodendauer
Re	[-]	Reynoldszahl
Sr	[-]	Strouhalzahl
t	[m]	Teilung der Bohrungen
T	[K]	Temperatur
u	[m/s]	Geschwindigkeit
x,y,z	[m]	Koordinaten

Indizes

av	gemittelt
abl	Punkt der Strömungsablösung
c	Kühlluft
in	bezogen auf den Eintritt der Meßstrecke
l	auf die Plattenlänge bezogen
vk	von der Plattenvorderkante aus
∞	auf den Hauptstrom bezogen
2	auf die Impulsverlustdicke am Ablösepunkt bez.

4. EINLEITUNG

Die heutige Turbomaschinenentwicklung ist insbesondere an einer Minimierung der Betriebskosten und einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Turbomaschine interessiert. Darüber hinaus sind ihre Größe und ihr Gewicht sehr wichtige restriktive Parameter. In diesem Zusammenhang steht die Forderung nach immer höheren spezifischen Leistungen der Komponenten, was u.a. durch die stetige Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur erfüllt wird. K. Hünecke (1993) schätzt die jährliche Steigerung der Turbineneintrittstemperatur seit 1947 mit 10–15 K ab. Demgegenüber steht eine Steigerung der Materialgrenztemperaturen seit 1960 von ca. der Hälfte.

Daraus ergibt sich die zwingende Notwendigkeit des Einsatzes von intensiven und effizienten Kühlmethoden, die bei minimalem Kühlmittelverbrauch optimale Kühleffektivitäten zeigen. Darüber hinaus dürfen durch die Kühlung keine zu großen Temperaturgradienten (Thermospannungen) im Bauteil auftreten und auch aerodynamische Verluste durch Sekundärströmungen, die durch Anwendung einer Kühlmethode erzeugt werden können, sollen gering bleiben. Aus dieser Anforderungsliste, ist schon zu erkennen, dass es wichtig ist, die Wirkungsweise und Effektivität der einzelnen Kühlmethoden, ihren Einfluss auf das Strömungsfeld und das Bauteil und den Einfluss einer Veränderung der Umgebungsbedingungen zu kennen. Im Vordergrund des hier vorgestellten Projektes steht die Filmkühlung, bei der kühlere Luft an der Oberfläche eines Bauteils entlang strömt und einen schützenden Film bildet.

Schon Mitte der fünfziger Jahre begann die Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Filmkühlung. R. J. Goldstein (1971) hat die Ergebnisse der Forschung bis zum Jahr 1971 zusammengefasst. Diese und auch nachfolgende Arbeiten wurden aber fast ausschließlich unter stationären Strömungsbedingungen durchgeführt oder die Messgrößen wurden zeitgemittelt aufgenommen. Die Filmkühlung in Turbomaschinen ist aber instationären Randbedingungen ausgesetzt. Zum einen ist die Zuströmung einer Turbinenschaufel durch die Nachläufe der vorangestellten Schaufelreihe gestört, was zu einer meist periodisch instationären Anströmung führt. Darüber hinaus können der Zuströmung einer Turbinenschaufel auch durch Überlagerung anderer Strömungsphänomene, durch auftretende Stöße oder durch freie Turbulenz der Strömung nach der Brennkammer zusätzlich instationäre Effekte überlagert sein.

Die zeitlich periodische Änderung der Anströmung nach

Größe und Richtung hat einen sehr großen Einfluss auf die Umströmung einer Turbinenschaufel. Sie bewirkt eine zeitliche Änderung der Druckverteilung und damit der Grenzschichtstruktur und ruft Verschiebungen und Veränderungen von Umschlagsgebieten und Ablösevorgängen in der Grenzschicht hervor. Im Falle der Filmkühlung haben die zeitlich periodischen Schwankungen des statischen Druckes an den Filmkühlbohrungen zunächst ein Pulsieren des austretenden Kühlstromes zur Folge. P. M. Ligrani et al. (1996) zeigten diese pulsierenden Kühlströme und weiterhin, dass eine periodische Änderung des statischen Druckes und der Geschwindigkeit in der Grenzschicht genau stromab der Kühlbohrungen zu einer komplexen Schwankung der Austrittsbahn der Kühlstrahlen, der Kühlstrahlverteilung und der Abdeckung der Oberfläche mit dem Kühlfilm führen. R. S. Abhari und A. H. Epstein (1992) fanden heraus, dass der statische Druck der Hauptströmung an der Kühlbohrung innerhalb einer instationären Zeitperiode unter bestimmten Bedingungen auch größer werden kann als der statische Druck des austretenden Kühlmediums, was zu einer Rückströmung in die Kühlbohrungen führt.

Als einer der ersten Arbeiten simulierten M. J. Rigby et al. (1990) Verdichtungsstöße des ersten Turbinenstators und dessen Nachläufe und untersuchten ihren Einfluss auf ein ebenes Turbinenschaufelgitter. Sie fanden heraus, dass der Einfluss der Instationarität auf die Filmkühlung an der Saugseite sehr stark dagegen an der Druckseite nur recht gering ist. Sie vermuteten, dass die stark reduzierte Filmkühleffektivität durch die vorbei laufenden Nachläufe darauf zurückzuführen sei, dass der Kühlfilm mehr abhebt. M. Sautner et al. (1992) untersuchten den Einfluss einer periodisch instationären Zuströmung auf ein ebenes Schaufelgitter. Sie zeigten, dass die Nachläufe den Kühlfilm stark beeinflussen und dass auch hier die Filmkühleffektivität deshalb an der gesamten Schaufel für alle untersuchten Ausblaseraten sinkt. Ihre Ergebnisse zeigten weiterhin, dass mit steigender Frequenz der periodisch instationären Zuströmung die Filmkühleffektivität zusätzlich abnimmt. S. Ou et al. (1994) und A. B. Mehendale et al. (1994) simulierten den Einfluss einer periodisch instationären Zuströmung auf eine filmgekühlte Turbinenschaufel. Auch sie kamen zu dem Ergebnis, dass mit steigender Frequenz der periodisch instationären Zuströmung die Filmkühleffektivität sinkt und der Wärmeübergangskoeffizient steigt.

In dem Bestreben Turbomaschinen durch höhere Leistungen und mit geringerem Gewicht immer weiter zu verbessern, gibt es noch ein weiteres Phänomen, das heutzutage fast immer auftritt. Durch die Steigerung der aerodynamischen Belastung und dadurch, dass ein Großteil der Schaufelgrenzschicht laminar ist, lassen sich Ablösungen und Ablöseblasen an den Schaufeln kaum vermeiden. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig ihren Einfluss auf das Strömungsfeld zu kennen und vorhersagen zu können.

Ablöseblasen werden seit vielen Jahren erforscht. Arbeiten von Gaster (1967), Horton (1969) und Roberts (1975) sollen hier nur stellvertretend als einige der früheren Arbeiten genannt werden.

Eine Ablöseblase entsteht, wenn ein zu großer positiver

Druckgradient auf eine laminare Grenzschicht wirkt. Abgelöst ist die Scherschicht sehr instabil, was dazu führen kann, dass Transition einsetzt, die Grenzschicht turbulent wird und wieder anlegt, weil eine turbulente Grenzschicht einen größeren positiven Druckgradienten ertragen kann ohne abzulösen. In der statischen Druckverteilung erscheint ein Plateau an dieser Stelle. Abgelöste Strömungsgebiete sind charakterisiert durch hohe Turbulenzgrade, groß – skalige Instationaritäten und plötzliche Änderungen des Wärmeüberganges.

Neben Bemühungen das Phänomen Ablöseblase in stationärer Strömung zu erklären, gibt es auch Forschungsarbeiten, die sich damit in instationärer Strömung befassen. V. Schulte et al. (1996) zeigten in einer Untersuchung der instationären Grenzschicht an der Saugseite einer hoch belasteten ND Turbinenschaufel, dass eine Ablöseblase, die unter stationären Bedingungen an der Saugseite auftrat, durch die vorbei laufenden Nachläufe der periodisch instationären Zuströmung zeitweise innerhalb der Periode unterdrückt wurde. Ähnliches konnte von K. Funazaki et al. (1998) durch Untersuchungen des zeitgemittelten Formfaktors an einer ebenen Platte mit aufgeprägtem Druckgradient bestätigt werden. W. Lou et al. (2000) führten Untersuchungen an einer ebenen Platte mit aufgeprägter Druckverteilung in periodisch instationärer Strömung durch und fanden heraus, dass höhere Reynoldszahlen eine frühere Transition herbeiführen und damit die Länge der Ablöseblase verringern. Sie zeigen, dass die periodische Zuströmung die Ablöseblase damit in eine pumpende Schwingung versetzt. Die Größe der zeitgemittelten Ablöseblase zeigte sich hierbei kleiner als unter stationären Bedingungen, obwohl die gemittelte Reynoldszahl kleiner war. Sie schlossen daher auf eine Minderungswirkung der Ausdehnung der Ablöseblase durch die instationäre Zuströmung.

Obwohl die Filmkühlung in Turbomaschinen einem instationären Strömungsfeld mit Ablöseblasen ausgesetzt ist, gibt es fast keine Arbeiten, die bei der Untersuchung der Filmkühlung das Auftreten einer Ablöseblase und deren Einfluss mit einbeziehen. Deshalb ist über die Wechselwirkung der Filmkühlung mit einer Ablöseblase sehr wenig bekannt.

In stationärer Strömung untersuchten S. Friedrichs et al. (1995) die adiabate Filmkühleffektivität an einer filmgekühlten Seitenwand eines ebenen Turbinenschaufelgitters. Sie zeigen, dass Kühlfluid, welches stromauf einer 3D – Ablöselinie ausgeblasen wird, stromab der Ablöseblase keine Kühlung bewirkt.

Um Kühlsysteme und Filmkühlung im Speziellen optimal auszulegen, ist es erforderlich den Einfluss einer Ablöseblase auf die Filmkühlung in instationärer Strömung zu kennen. Aus diesem Grund befasst sich die hier vorgestellte Untersuchung mit diesem Problem.

5. VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

5.1. Versuchsaufbau

Die experimentelle Untersuchung wurde am Niedergeschwindigkeits – Saugwindkanal am Fachgebiet Luftfahrtantriebe des ILR der TU Berlin durchgeführt, in dessen Meßstrecke eine periodisch instationäre Strömung erzeugt werden kann.

Der prinzipielle Aufbau des Windkanals soll an der folgenden Skizze erklärt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsanlage ist in der Arbeit von W. Lou (2000) zu finden.

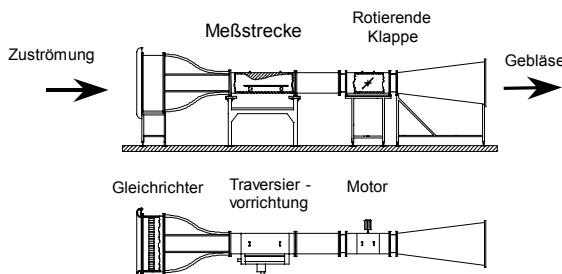


BILD 1. Niedergeschwindigkeits – Saugwindkanal

Der Windkanal ist in modularer Bauweise aufgebaut aus einem Einlauf, einer Düse, der Meßstrecke, einem Instationaritätsgenerator und einem Gebläse. Luft wird aus der Versuchshalle angesaugt, über Filtermatten und Wabengleichrichter gesäubert und homogenisiert, und durch eine Düse mit 9:1 Kontraktionsverhältnis geleitet, um die Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen und den Turbulenzgrad zu senken. Die Meßstrecke ist 1500 mm lang und hat einen quadratischen Querschnitt mit 400 mm Kantenlänge. In die Meßstrecke ist eine ebene, filmgekühlte Platte eingebaut, die in Strömungsrichtung auf drei Positionen innerhalb der Meßstrecke festgelegt werden kann. Gegenüber der ebenen Platte ist eine konturierte Gegenwand positioniert, die für eine turbomaschinenähnliche Druckverteilung an der ebenen Platte sorgt. Innerhalb der Meßstrecke kann ein Meßsensor in einem 3D Feld über der Platte traversiert werden. Stromab der Meßstrecke liegt der Instationaritätsgenerator. Er besteht aus einer rotierenden Klappe, die den Strömungsquerschnitt periodisch sperrt. Amplitude und Frequenz der Geschwindigkeitsschwankung in der Meßstrecke können über die Klappengröße und ihre Drehfrequenz eingestellt werden. Weiter stromab schließt sich ein Diffusor und eine Beruhigungskammer an.

In der Meßstrecke kann ein auf die gesamte Plattenlänge bezogener Reynoldszahlbereich von $0.5 \cdot 10^5$ – $2.6 \cdot 10^6$ erzeugt werden. Dies entspricht einem auf die Impulsverlustdicke am Ablösepunkt bezogenen Impulsverlustdicken – Reynoldszahlbereich von 80 – 630. Die Drehfrequenz der rotierenden Klappe kann zwischen 0 – 100 Hz stufenlos eingestellt werden, was bei kleineren Reynoldszahlen einem plattenlängenbezogenen Strouhalzahlbereich von 0 – 40 entspricht. Wieder auf die Impulsverlustdicke am Ablösepunkt bezogen entspricht es einer maximalen Impulsverlustdicken – Strouhalzahl von 0.015. Die Möglichkeit verschieden große Klappen einzusetzen, gestattet eine Relativamplitude der

Geschwindigkeit von bis zu 20%. A. Binder et al. (1988) haben festgestellt, dass der Geschwindigkeitsdefekt in Schaufelnachläufen abhängig von der aerodynamischen Güte der Schaufel und dem Abstand zur Hinterkante des stromauf liegenden Gitters zwischen 5 – 20% liegt. Der Turbulenzgrad am Eintritt der Meßstrecke variiert zwischen 0.25 und 0.75%.

Die filmgekühlte Versuchsplatte ist 1000 mm lang, 400 mm breit und 30 mm dick. Die Kühlluft strömt durch eine Reihe von 7 scharfkantigen, zylindrischen Kühlbohrungen mit einem Neigungswinkel von 35° in die Meßstrecke. Der Durchmesser der Kühlrohrchen beträgt 8 mm und das Teilungs- zu Durchmesserverhältnis der Kühlbohrungen ist 3:1.

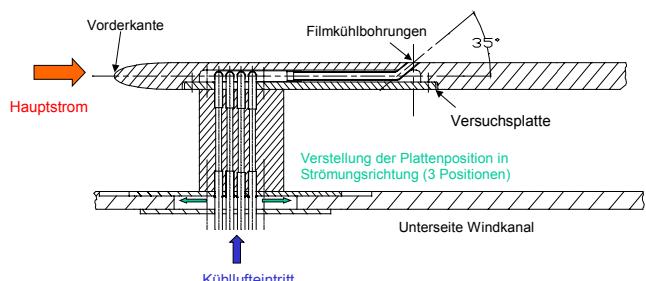


BILD 2. Schnitt: vorderer Teil der Versuchsplatte

In Bild 2 ist eine Schnittdarstellung durch den vorderen Teil der Versuchsplatte gezeigt. Hieran wird der Weg der Kühlluft aus einer Beruhigungskammer heraus in die Meßstrecke dargestellt. Kühl Luft wird von unten aus einer Beruhigungskammer in die Kühlrohrchen gespeist, welche diese durch die vertikale Halterung der Versuchsplatte hindurch in die Platte führen. Dort wird die Kühl Luft wiederum in Kühlrohrchen horizontal innerhalb der Platte zur Ausblasestelle in die Meßstrecke geführt. Diese Kühl Luftführung hat den Vorteil, dass die einzelnen 7 Kühlströme separat geregelt und eingestellt werden können. Dagegen bringt sie aber auch den Nachteil eines stark ungleichmäßigen Geschwindigkeitsprofils am Kühl Luftaustritt bei den hohen Geschwindigkeiten am Stromabende der Bohrung aufreten und kleine am stromauf liegenden. Dies ist auf ein Ablösegebiet innerhalb der Kühlrohrchen zurückzuführen.

5.2 Messtechnik

Die Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und -temperatur wurden mit einem Einfachhitzdraht (Drahtdurchmesser $5 \mu\text{m}$) und mit Hilfe eines TSI IFA 300 Anemometer – Systems im Konstant-Temperatur-Modus bzw. Konstant-Strom-Modus durchgeführt. Während der Messungen der Geschwindigkeit wurde mit einer isoenergetischen Einblasung gearbeitet. Die Temperaturfelder wurden mit Kühltemperaturen um $11-12^\circ\text{C}$ gemessen.

5.3 Numerisches Modell

Mit Hilfe des kommerziellen CFD – Softwarepaket Fluent 6.0 und dem Geometrie- und Netzgenerator GAMBIT 2.0 wurde ein numerisches Modell von der untersuchten Platte erstellt. Im Rechenmodell wurde aufgrund von begrenzten Rechnerkapazitäten und für vertretbare Rechenzeiten nur der Bereich um die mittlere Kühlbohrung simuliert, wobei

mit Hilfe von periodischen Randbedingungen indirekt auch die angrenzenden Bohrungen im Modell integriert sind. Die Zellenanzahl konnte somit auf ca. 400 000 reduziert werden. Bild 3 zeigt den vernetzten Bereich über der Versuchsplatte.

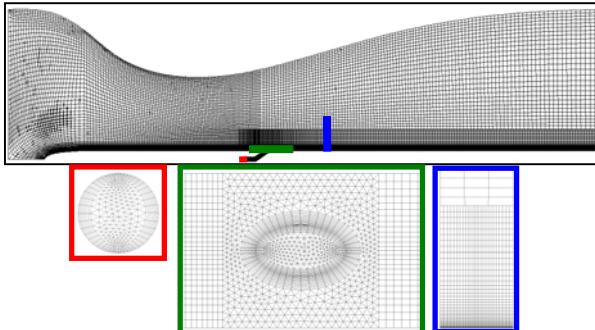


BILD 3. Vernetztes Rechengebiet

Im Bild bewegt sich der Hauptstrom von links nach rechts. Die Kühlströmung tritt durch das Kühlrohrchen innerhalb der Versuchsplatte am unteren Rand des Rechengebietes ein. Es ist als zeitlich konstantes, rotationssymmetrisches Geschwindigkeitsprofil definiert. Die Oberfläche der Versuchsplatte ist als adiabat vorgegeben.

Als Turbulenzmodell wurde das „realizable k-e-Modell“ gewählt, weil es aus Vorarbeiten als am geeignetensten hervorging und weil es besonders für Strömungen mit starkem Druckgradienten empfohlen wird. Im Bereich stromauf der Ausblasung wird die Turbulenzproduktion unterdrückt, wodurch eine laminare Grenzschicht mitsamt Ablösung erzeugt werden kann.

6. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Bei Filmkühluntersuchungen ist es üblich das Koordinatensystem in die Bohrungsmitte zu legen, da die Bohrungslage ungemein wichtig ist. Darüber hinaus ist es sinnvoll und üblich die x - Koordinate mit dem Bohrungsdurchmesser zu normieren.

Die vorgestellten Messergebnisse werden sich auf das in Bild 4 gezeigte Koordinatensystem beziehen. Die Messungen werden an drei verschiedenen z - Positionen vorgenommen, um bei vertretbarem Messaufwand Informationen über die dreidimensionale Entwicklung des Strömungsfeldes zu erhalten.

Messungen des Geschwindigkeitsprofils der austretenden Kühlluft haben ergeben, dass sie ungleichmäßig aus den Bohrungen tritt. Das Austrittsprofil sieht auch ohne Einfluss der Hauptströmung in Stromabrichtung verzerrt aus. Bild 5 zeigt den Verlauf des Durchflusskoeffizienten c_D der Kühlbohrungen für einen steigenden realen Kühlmassenstrom.

$$c_D = \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{ideal}}}$$

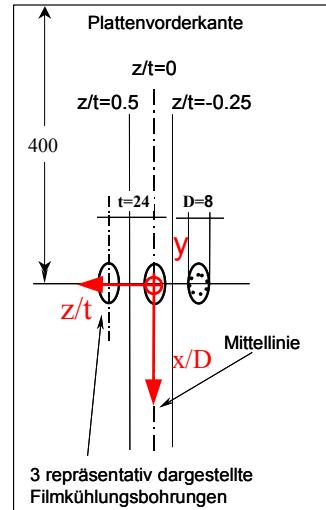


BILD 4. Definition des Koordinatensystems

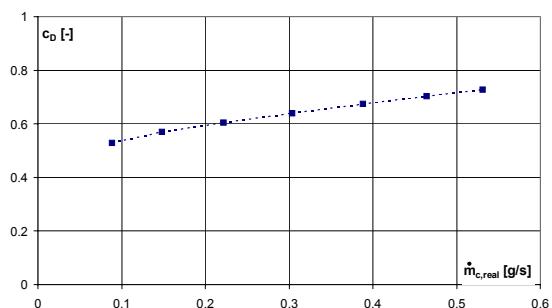


BILD 5. Durchflusskoeffizient der Kühlbohrungen

Als Ursache für dieses Phänomen kann eine Ablöseblase in den Kühlrohrchen ein wenig stromauf des Kühlaustrittes angegeben werden. Da kein geeigneter Zugang für Messsonden gefunden werden konnte, wurde die Ablöseblase nicht messtechnisch sondern numerisch nachgewiesen.

Die Geschwindigkeitsverteilung im Kühlrohrchen (Bild 6) zeigt sehr gut die Ablöseblase im Rohrquerschnitt. Der physikalische Hintergrund ist bekannt. Durch die an den gekrümmten Stromlinien angreifende Zentrifugalkraft wird ein radialer Druckanstieg von der Rohrinnen- zur Außenseite hervorgerufen. An der Rohrinnenseite wirkt auf das Fluid am Krümmungsaustritt eine Druckerhöhung, die eine lokale Ablösung der Strömung bewirken kann.

Als Konsequenz werden die durchgeführten Testreihen im folgenden durch zwei Ausblase- bzw. Impulsratenraten beschrieben. Einerseits durch die üblich angegebenen mittleren M_{av} bzw. I_{av} , die mit der mittleren Kühlgeschwindigkeit gebildet werden. Anderseits durch korrigierte M_{korr} bzw. I_{korr} , die mit der mittleren Geschwindigkeit des schnelleren Kühlstrahlteils im stromab Bereich der Bohrung gebildet werden. Diese kann mit der sehr viel kleineren effektiv genutzten Bohrungsfläche berechnet werden, die mit Hilfe des c_D - Wertes ermitteltet wird.

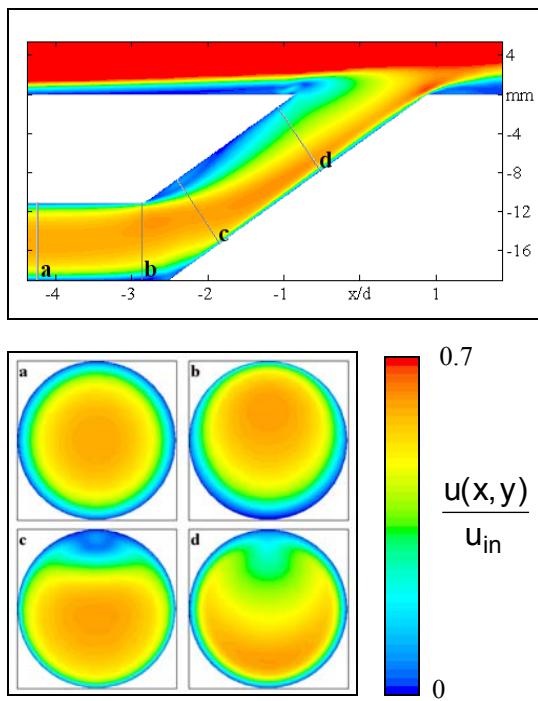


BILD 6. Geschwindigkeitsverteilung im Kühlrohrchen bei $Re_1=3.06 \cdot 10^5$ und $M_{av}=0.36$

6.1. Das Geschwindigkeitsfeld

Das stationäre Geschwindigkeitsfeld um eine Kühlluftbohrung herum wird in Bild 7 beispielhaft gezeigt.

In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass der eingeblasene Luftstrahl prinzipiell zwei Effekte hat – er wirkt als Strömungsstörung und hat eine Verdrängungswirkung. Wird die Luft vor oder am Ablösepunkt eingeblasen, ist keine Ablöseblase im Strömungsfeld mehr vorhanden. Aufgrund der Störungswirkung des Luftstrahls werden Turbulenzen erzeugt, die diese unterdrücken. Wird die Luft stromab des Ablösepunkts eingeblasen, ist sie weiterhin vorhanden wie Bild 7 zeigt.

Sie endet allerdings in der Ebene der Bohrungen am Punkt der Lufteinblasung. Aufgrund der Strömungsbeschleunigung um den Luftstrahl herum endet sie auch zwischen den Bohrungen örtlich früher als im Fall ohne Lufteinblasung. Weiterhin wurde festgestellt, dass sich das instationäre Verhalten der Ablöseblase stromauf der Filmkühlungsbohrungen nicht wesentlich durch die Ausblasung ändert. (Die Rückströmung konnte in CFD-Simulationen gut visualisiert werden. Darüber hinaus zeigt der berechnete Formparameter aus Messdaten eindeutig auf eine Ablöseblase stromauf der Einblasung hin.)

6.2. Das stationäre Temperaturfeld

Zur leichteren Interpretation werden die Temperaturdaten normiert dargestellt. Die Normierung wurde derart vorgenommen, dass praktisch eine Art Kühlwirkung dargestellt ist, wie sie bei Oberflächentemperaturen als sogenannte Filmkühleffektivität üblich ist. Der Vorteil hierbei ist, dass erstens verschiedene Messreihen mit unterschiedlichen Randtemperaturen vergleichbar sind,

und zweitens gibt so der wandnächste Punkt einen guten Anhaltswert für die zu erwartende Filmkühleffektivität. Die normierte Temperatur ist folgendermaßen definiert:

$$(1) \quad T_{\text{norm}} = \frac{T(x, y, z) - T_{\infty}}{T_c - T_{\infty}}$$

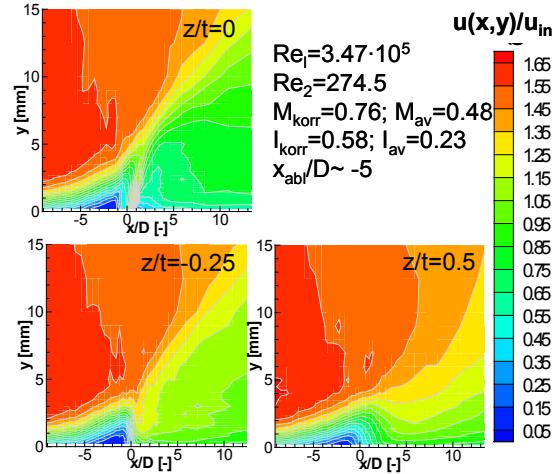


BILD 7. stationäre Geschwindigkeitsverteilung

Bild 8 zeigt die Verteilung der normierten Strömungstemperatur für eine Variation der Ausblasen- bzw. Impulsrate bei sonst annähernd konstanten Strömungsbedingungen unter stationären Bedingungen. Die Messergebnisse zeigen zunächst die erwarteten Tendenzen.

In der Messreihe mit der höchsten Ausblaserate von $M_{\text{korr}}=1.36$ ist aufgrund des höchsten eingebrachten Kühlmassenstroms das zur Verfügung stehende Kühlpotential am größten. In diesem Fall hat der Kühlstrahl allerdings auch den höchsten Impuls, weshalb er sehr weit in die Hauptströmung eindringen kann und das Kühlfluid weit von der zu kühlenden Oberfläche wegtransportiert. Der Strahl kann erst relativ spät von der Hauptströmung zur Wand hin umgelenkt werden. An dieser Stelle hat er schon einen großen Teil seines Kühlpotentials durch intensive Mischung mit der Hauptströmung verloren, so dass er in Wandnähe nur noch ca. 20-25% des anfänglichen Potentials aufweist. Dies ist in den Verteilungen gut erkennbar. Am weitaus geringsten ist die Kühlwirkung zwischen den Bohrungen ($z/t=0.5$). Bis zu 9 Bohrungsdurchmesser stromab der Einblasestelle tritt gar keine Kühlung auf und weiter stromab ist die Kühlwirkung auch nur sehr gering zu erwarten. Obwohl also ein hoher Kühlmassenstrom eingesetzt wurde, ist die Kühlung enttäuschend gering, was auf den hohen Strahlimpuls zurückzuführen ist.

Wird die Ausblaserate auf $M_{\text{korr}}=0.73$ gesenkt, ist die erreichte Kühlwirkung aufgrund der geringeren Eindringtiefe des Kühlstrahls erheblich höher, obwohl das im Strömungsfeld zur Verfügung stehende Kühlpotential kleiner ist. Dieses ist aber weitaus effizienter eingesetzt.

Im letzten untersuchten Fall ist die Ausblaserate weiter auf $M_{\text{korr}}=0.4$ gesenkt worden. In diesem Fall kann der Kühlstrahl ebenfalls schnell zur Wand hin umgelenkt werden. Da das Kühlpotential aber recht gering ist, sinkt die Kühlleistung in Strömungsrichtung sehr schnell ab.

Dieser Einfluss der Ausblaserate ist für ein Strömungsfeld ohne Ablöseblase stromauf der Einblasung nicht neu. Es zeigt sich also, dass die Blase auf die Kühlung stromab der Einblasung keinen großen Einfluss zu nehmen scheint.

Ein weiteres, auffallendes Phänomen in den Messergebnissen in Bild 8 ist das kleine Gebiet kühlerer Temperaturen in Wandnähe direkt stromauf des Strahls. Dieses tritt in allen durchgeführten Messreihen in allen Messebenen auf und zieht sich auffallend weit stromauf. In diesem Gebiet kann eine echte Kühlwirkung bis ungefähr 3-4 Durchmesser stromauf der Bohrungen erwartet werden. Als mögliche Ursachen kommen zunächst zwei Mechanismen in Frage.

Einerseits könnte dieses Gebiet eine Folge der Wärmeleitung innerhalb der Platte sein. Die Platte könnte um die Kühlrohrchen herum gekühlt werden, weshalb die Luft über diesem Teil der Platte ebenfalls kühler sein würde bzw. weshalb die Kaltdrahtmessungen aufgrund der direkten Wandnähe beeinflusst würden. Unwahrscheinlich wird diese Theorie durch die Tatsache, dass sich dieses Niedertemperaturgebiet in allen Ebenen sehr weit stromauf zieht, aber weder stromab, noch direkt zwischen den Bohrungen zu finden ist. Dennoch kann die Theorie mit diesen Argumenten noch nicht vollständig verworfen werden.

Die zweite Ursache ergibt sich aus dem Vergleich mit Messergebnissen der Strömungsgeschwindigkeit, der gezeigt hat, dass dieses Niedertemperaturgebiet genau an der Stelle liegt, wo auch die Ablöseblase ist. Die Kühlluft könnte damit innerhalb des Rezirkulationsgebietes vom Kühlstrahl aus stromauf und auch ein wenig quer zur Anströmung transportiert werden. Eine Steuerung dieses Phänomens könnte genutzt werden, um die Kühlwirkung auf ein Gebiet stromauf der Einblasung zu erweitern, wenn eine Ablöseblase vorhanden ist.

J. Andreopoulos et al. (1984) konnten eine fast ähnliche Beobachtung bei ihren Messungen an einem senkrecht in eine Querströmung eingeblasenen Strahl ohne im Strömungsfeld auftretende Ablöseblase machen. Im Aufstaugebiet des Strahls bildete sich ein Hufeisenwirbel aus. Sie beschrieben, dass ein Teil des Strahlfluids in den Hufeisenwirbel eintrat und in diesem damit auch ein kleines Stück entgegen der Hauptstromrichtung getragen wurde.

Bevor die Frage nach der Ursache dieses Phänomens nun abschließend beantwortet wird, soll zunächst ein Blick auf die gemessenen Verteilungen der Strömungstemperatur unter periodisch instationären Strömungsbedingungen geworfen werden.

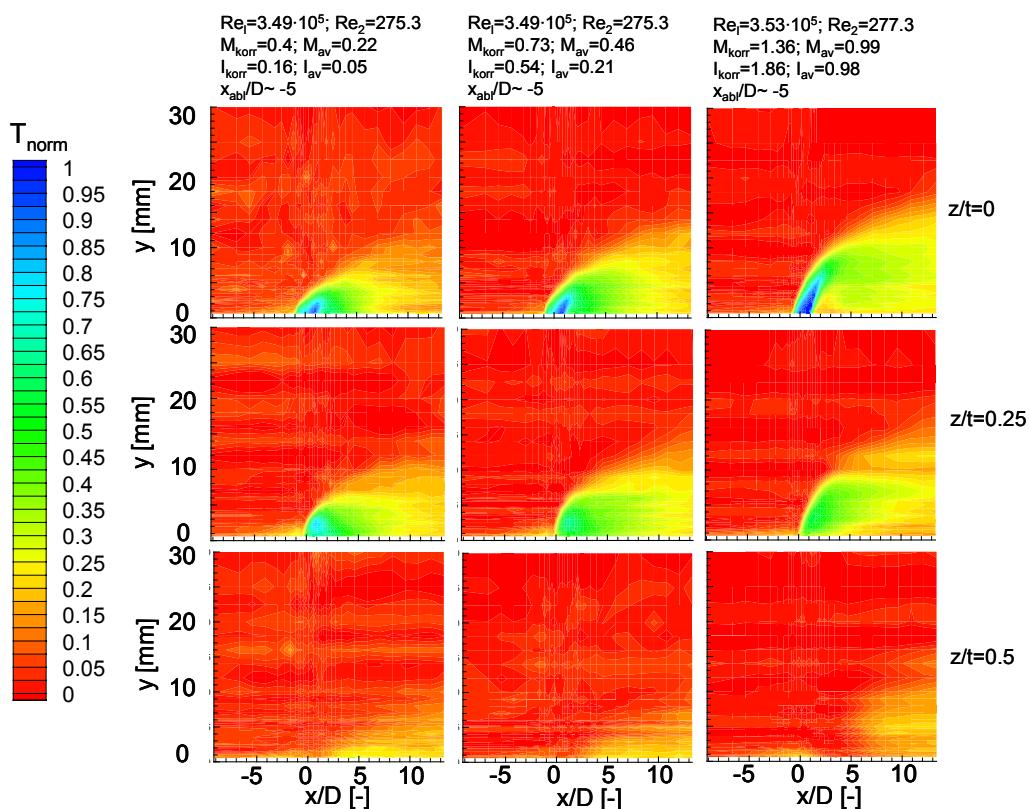


BILD 8. Stationäres Temperaturfeld für 3 Messfälle

6.3. Das periodisch instationäre Temperaturfeld

Nun wird das Temperaturfeld in periodisch instationärer Außenströmung betrachtet. Bild 10 zeigt die Temperaturverteilung zu den im Bild 9 angegebenen Zeitpunkten innerhalb der Periode.

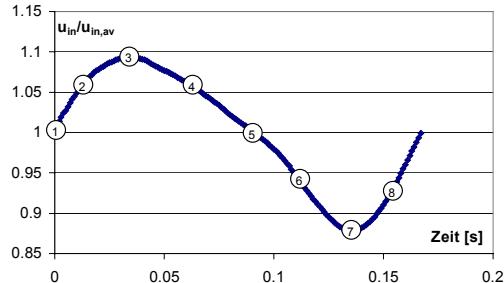


BILD 9. Phasengemittelte Geschwindigkeit am Eintritt der Meßstrecke

Die Temperaturverteilungen zeigen, dass sich das Temperaturfeld um den Strahl herum innerhalb einer Periodendauer ändert. Das Niedertemperaturgebiet scheint eine pumpende Bewegung auszuführen bzw. seine Ausdehnung ändert sich periodisch.

Es wird allmählich kleiner bis zum Zeitpunkt 7, von dem aus es dann in seiner Ausdehnung wieder rasch größer wird. Weitergehende Untersuchungen mit einer Infrarotkamera haben gezeigt, dass diese periodische Änderung der Ausdehnung des Gebietes kleinerer Strömungstemperaturen aufgrund der Trägheit der Platte erst bei unrealistisch kleinen Schwingungsfrequenzen auch eine periodische Änderung der Oberflächentemperaturen der Platte zur Folge hat. Bei den Oberflächentemperaturen stellt sich ein Mittelwert ein, der immer höher ist als im stationären Vergleichsfall. Damit bestätigt sich, dass die Filmkühlung im periodisch instationären Fall uneffektiver ist als unter vergleichbaren stationären Strömungsbedingungen.

Als Grund für die periodische Ausdehnungsänderung des Niedertemperaturgebietes kann einerseits die sich ebenfalls periodisch ändernde Ausblaserate angeführt werden. Die Druckschwankungen am Kühlluftaustritt beeinflussen den austretenden Kühlmassenstrom und zwingen ihm eine periodische Änderung auf. Analytische Untersuchungen haben ergeben, dass aufgrund der relativ langen Rohrleitungen, die das Kühlfluid aus der Beruhigungskammer zu den Kühlbohrungen führen, die periodische Kühlstromänderung sehr wahrscheinlich nicht in Phase mit der aufgeprägten Druckschwankung des Hauptstromes liegt, was bedeutet, dass sich die Schwingungen nicht aufheben und sich die Ausblaserate periodisch ändert.

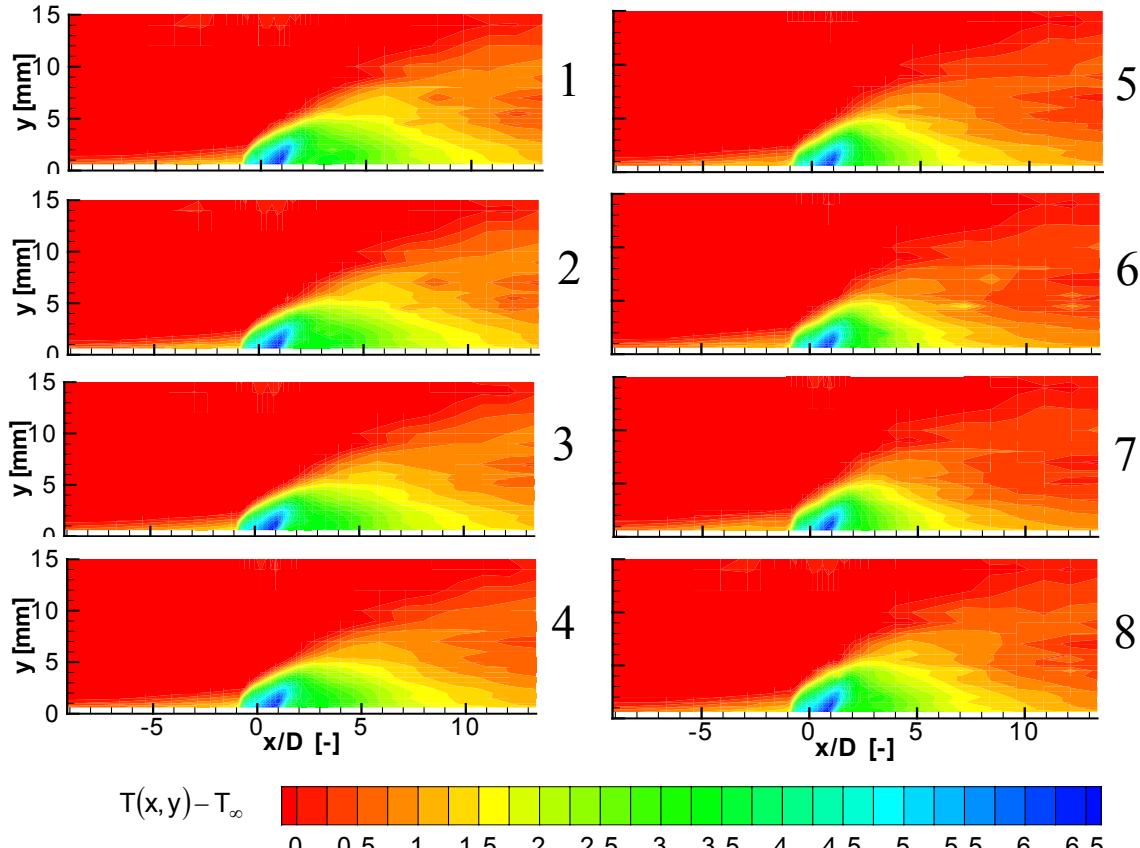


BILD 10. periodisch instationäre Temperaturverteilung bei $z/t=0$

Aus diesen Überlegungen folgt weiter, dass sich auch die Impulsrate periodisch ändert, welche die Umlenkung des Kühlstrahls durch den Hauptstrom maßgeblich beschreibt. Der Strahl wird also eine Nickbewegung ausführen und damit das Kühlfluid innerhalb der Periode unterschiedlich in y Richtung verteilen. Dieser Effekt unterstützt die periodische Ausdehnungsänderung des Niedertemperaturgebietes.

In den Verteilungen fällt darüber hinaus auf, dass das kleine Gebiet niedriger Temperaturen in Wandnähe stromauf der Ausblasung wieder und zwar in allen Zeitschritten auftritt. Die Messungen wurden an den drei in Bild 4 markierten Ebenen durchgeführt und es kann bestätigt werden, dass dieses Gebiet auch wieder in den anderen zwei Messebenen auftritt und nicht auf einen Bereich um die Kühlbohrungen herum begrenzt ist. Dies unterstützt weiter die Erklärung, dass Kühlluft innerhalb der Ablöseblase stromauf und auch quer zur Anströmung transportiert wird. Wirklich bestätigt werden kann dies aber nur, wenn die Wärmeleitung innerhalb der Versuchsplatte als mögliche Ursache wirklich ausgeschlossen werden kann, was Untersuchungen an einer adiabaten Platte erfordert. Eine messtechnische Realisierung ist nur mit großem Aufwand und einschneidenden Einschränkungen möglich zum Beispiel über die Superpositions methode oder die Wärme-Stoff-Analogie. Im Gegensatz dazu ist die numerische Simulation der adiabaten Platte vergleichsweise einfach. Die Kühlströmung wurde als zeitlich konstantes, rotationssymmetrisches, turbulentes Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Das der Hauptströmung ist über dem Eintrittsquerschnitt konstant, ändert sich aber periodisch mit der Zeit wie in Bild 11 dargestellt. An der im Diagramm markierten Stelle innerhalb der Zeitperiode sind die Ergebnisse dargestellt. Die Randwerte der Rechnung sind: $Re=3.06 \cdot 10^5$, $Sr=1.2$, $Mav=0.36$, $Am=0.1$.

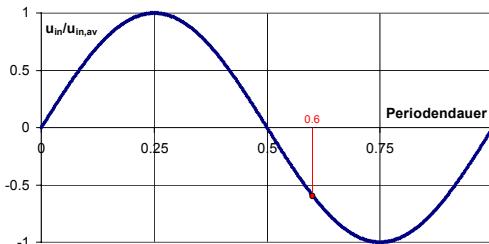


BILD 11. Geschwindigkeit am Eintritt der Meßstrecke für eine Periode

Durch die in der Rechnung vorgegebenen Geometrie der Versuchsstrecke mit konturiert Gegenwand wurde die aufgeprägte Druckverteilung mitsimuliert. Das Ergebnis zeigt, dass an vergleichbarer Stelle wie in der Messung eine Ablöseblase auftritt. Der Ablösepunkt liegt ungefähr bei $x/D \sim -5.8$. Dies zeigen die negativen Wandschubspannungswerte in Bild 12 (oben). Nur rot eingefärbte Gebiete weisen eine positive Schubspannung auf. Darüber hinaus ist der Hufeisenwirbel stromauf der Strahls zu erkennen.

In der Verteilung der adiabaten Filmkühleffektivität in Bild 12 sind zur besseren Orientierung die Linien konstanter Werte von 0.5 und 0.1 als schwarze Linien eingetragen. Es ist erkennbar, dass eine wirklich Kühlwirkung bis

ungefähr 1.5 Durchmesser stromauf auftritt. Auch zwischen den Bohrungen besteht eine Stromaufwirkung. Qualitativ kann hier von einer guten Übereinstimmung zur Messung gesprochen werden, wenngleich die stromauf transportierte Luft in der Rechnung etwas unterschätzt wird, was sehr wahrscheinlich mit dem etwas unterschiedlichen Kühlluftfeintrittsprofil in Messung und Rechnung erklärt werden kann.

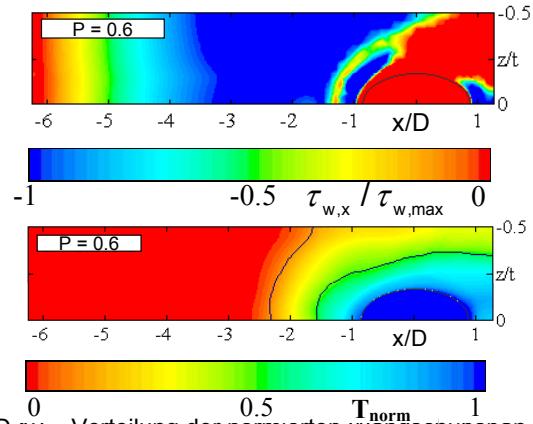
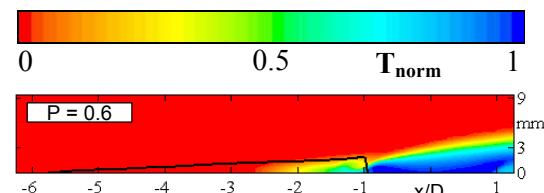


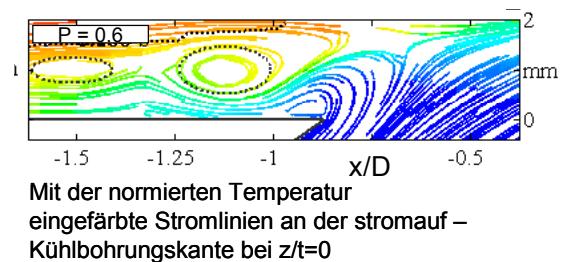
BILD 12. Verteilung der normierten Wandschubspannung und Filmkühleffektivität an der Platte

Bild 13 zeigt nun die Strömung selbst. Die Verteilung der normierten Strömungstemperatur bei $z/t=0$ ist dargestellt. Im oberen Diagramm ist zusätzlich die Trennstromlinie des Rückstromgebietes dargestellt. Hieran ist zu sehen, dass sich die stromauf transportierte Luft nur innerhalb des Rückstromgebietes befindet.

Die Stromlinien im unteren Teil von Bild 13 zeigen eindeutig wie ein Teil der austretenden Kühlluft stromauf strömt. Gepunktet sind wieder die Trennstromlinie und auftretende Wirbelkerne markiert. Direkt stromauf des Strahls befindet sich der Hufeisenwirbel. Weiter davor ist die Ablöseblase gelegen.



Verteilung der normierten Temperatur bei $z/t=0$ mit eingezeichnet Trennstromlinie des auftretenden Rückstromgebietes



Mit der normierten Temperatur eingefärbte Stromlinien an der stromauf Kühlbohrungskante bei $z/t=0$

BILD 13. Verteilung der normierten Temperatur bei $z/t=0$

Es wurde schon beschrieben, dass das Kühlluftaustrittsprofil aufgrund der in den Kühlrohrchen auftretenden Ablöseblase stark verzerrt ist. Auch in der Rechnung tritt eine Ablöseblase im Röhrchen auf und die Verzerrung des Kühlluftprofils in stromab Richtung ist ebenfalls, wenn auch nicht ganz so ausgeprägt, vorhanden. Damit ist der Strahlimpuls im stromauf gelegenen Teil der Bohrung in der Messung kleiner, was es stromauf gelegenen Wirbelgebieten leichter macht, einen Teil des Kühlfluids stromauf zu transportieren und so den Unterschied zu den Rechenergebnissen erklärt.

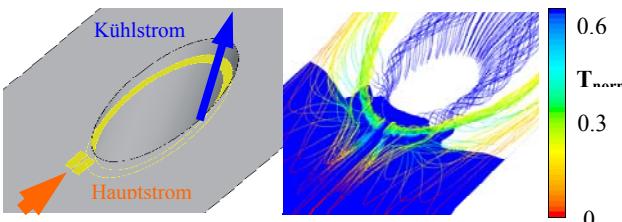


BILD 14. Stromlinien eingefärbt mit der normierten Temperatur des stationären Vergleichsfalls

Bild 14 zeigt den Verlauf ausgesuchter Stromlinien eingefärbt mit der normierten Temperatur im stationären Vergleichsfall ($Re_f=3.06 \cdot 10^5$, $M_{av}=0.36$). Links im Bild sind die Flächen von denen die Stromlinien starten gelb markiert. Zusätzlich zu den Stromlinien ist rechts zur Visualisierung der Ablöseblase die Null – Geschwindigkeitsfläche innerhalb der Ablösung blau gekennzeichnet.

Der hintere Teil der Kühlluft strömt in Hauptströmungsrichtung. Dort ist schön die Bildung des Schornsteinwirbels erkennbar. Stromauf der Bohrung ist der Hufeisenwirbel sichtbar. Kühlluft wird durch ihn wie auch darüber hinaus in der Ablöseblase stromauf und quer zur Anströmung transportiert.

6.4. Einfluss der Ausblase- und Amplitudenrate

In der Arbeit wurde auch der Einfluss des für Filmkühlungsuntersuchungen sehr wichtigen Parameters Ausblaserate und der die periodisch instationäre Strömung beschreibenden Parameters Amplitudenrate auf die Stromaufkühlwirkung besprochen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Ausblaserate keinen bedeutenden Einfluss auf die Ausdehnung oder das Verhalten der Ablöseblase hat. Das Niedertemperaturgebiet stromauf ist allerdings für kleinere Ausblaseraten bzw. kleinere Kühlgeschwindigkeiten bei gleicher Hauptgeschwindigkeit größer und effektiver, da der Strahlimpuls in diesem Fall im stromauf liegenden Bereich der Kühlbohrung kleiner ist und sich dieses Gebiet kleineren Impulsen über eine größere Fläche der Bohrung erstreckt, so dass mehr Kühlluft von den Rückströmgebieten angesaugt und stromauf transportiert werden kann.

Die Amplitudenrate hingegen beeinflusst das Ausmaß der periodischen Ausdehnungsänderung der Ablöseblase innerhalb der Zeitperiode, was allerdings entkoppelt von der Filmkühlung geschieht. W. Lou (2000a) führt dies auf die Abhängigkeit des Ablösewinkels der Trennstromlinie vom Oszillationsbereich des Wiederanlegepunktes zurück,

der bei größeren Amplitudenraten größer ist.

Die Ausdehnung der Blase in der Höhe bzw. ihr Ablösewinkel ist nicht ausschlaggebend für die Größe und Effektivität des Niedertemperaturgebietes.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Untersuchung der Strömungstemperatur und der Filmkühleffektivität in einem filmgekühlten Strömungsfeld an einer ebenen Versuchsplatte vorgestellt, an der aufgrund einer aufgeprägten turbomaschinenähnlichen Druckverteilung eine Ablöseblase auftritt. Die Untersuchung wurde unter stationären und periodisch instationären Strömungsbedingungen durchgeführt. Ziel war die Beschreibung des Einflusses der Ablöseblase auf die Temperaturverteilung im Strömungsfeld bzw. der Filmkühleffektivität. Die Ergebnisse können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Unter periodisch instationären Strömungsbedingungen führt das Niedertemperaturgebiet um den Kühlstrahl eine Art pumpende Bewegung aus bzw. seine Ausdehnung ändert sich innerhalb einer Periodendauer. Als Grund kann die sich periodisch ändernde Ausblase- bzw. Impulsrate angegeben werden. Zum einen ändert sich der eingeblasene Kühlmassenstrom innerhalb der Periode und zum anderen wird er aufgrund der Nickbewegung des Strahls in einer Periode in y Richtung unterschiedlich verteilt.
- Es konnte kein entscheidender Einfluss der Ablöseblase stromauf der Einblasung auf die Kühlwirkung stromab festgestellt werden.
- Die Blase stromauf der Einblasung nimmt aber entscheidenden Einfluss auf die Kühleffektivität in diesem Gebiet selbst. Innerhalb des Rückstromgebietes wird ein Teil der eingeblasenen Kühlluft stromauf und auch quer zur Anströmung transportiert. Hierbei kann eine echte Kühlwirkung bis zu 3-4 Durchmesser stromauf erwartet werden. Dies wird durch einen niedrigen Strahlimpuls im Stomaufbereich der Bohrung unterstützt. Eine Steuerung dieses Phänomens könnte genutzt werden, um die Kühlwirkung auf ein Gebiet stromauf der Einblasung zu erweitern, wenn eine Ablöseblase vorhanden ist.
- Diese Kühlwirkung im Bereich stromauf der Einblasung wird für kleinere Ausblaseraten größer, weil der Strahlimpuls und damit die Neigung des Strahls durch die Grenzschicht hindurchzuschießen dann kleiner ist.

8. LITERATUR

- R. S. Abhari, A. H. Epstein (1992)
An Experimental Study of Film Cooling in a Rotating Transonic Turbine
37th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cologne, Germany, June 1-4, 92-GT-201, ASME J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 63-70
- J. Andreopoulos, W. Rodi (1984)
Experimental Investigation of Jets in a Crossflow
J. Fluid Mech., Vol. 138, Seite 93-127, 1984
- A. Binder, T. Schroeder, J. Hourmouziadis (1988)
Turbulenz Measurements in a Multistage Low-Pressure Turbine
Gas Turbine and Aeroengines Congress and Exhibition, June 5-9, 1988, Amsterdam, Netherlangs, 88-GT-79
- M. Deinert, J. Hourmouziadis (2003)
Filmkühlungsuntersuchungen in periodisch instationärer Strömung mit lokaler Ablöseblase
Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2003, 17.-20. November 2003, München, DGLR-2003-204
- M. Deinert, J. Hourmouziadis (2005)
Einfluss einer Ablöseblase auf die Temperaturverteilung und Filmkühleffektivität im filmgekühlten, periodisch instationären Strömungsfeld
Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2005, 26.-29. September 2005, Friedrichshafen, DGLR-2005-164
- S. Friedrichs, H. P. Hodson, W. N. Dawes (1995)
Distribution of Film-Cooling Effectiveness on a Turbine Endwall Measured Using the Ammonia and Diazo Technique
40th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Houston, Texas, June 5-8, 1995, 95-GT-1
- K. Funazaki, E. Koyabu (1998)
Effects of Periodic Wake Passing Upon Flat-Plate Boundary Layers Experiencing Favorable and Adverse Pressure Gradients
43rd International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Stockholm, Sweden, June 2-5, 98-GT-114
- M. Gaster (1967)
The Structure and Behaviour of Laminar Separation Bubbles
Aeronautical Research Council, R&M 3595
- R. J. Goldstein (1971)
Film Cooling
In Irvine, T.F.; Hartnett, J.P., Hrsg., Advances in Heat Transfer, Bd. 7, S. 321-379, Academic Press, Inc.
- H. P. Horton (1969)
A Semi-empirical Theory for the Growth and Bursting of Laminar Separation Bubbles
Aeronautical Research Council, CP1073
- K. Hünecke (1993)
Flugtriebwerke – Ihre Technik und Funktion, 6. Auflage
Motorbuch Verlag Stuttgart
- P. M. Ligrani, R. Gong, J. M. Cuthrell (1996)
Bulk Flow Pulsations and Film Cooling – I. Injectant Behavior
Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 39/11, 2271-2282
- W. Lou, J. Hourmouziadis (2000)
Separation Bubbles Under Steady and Periodic-Unsteady Main Flow Conditions
45th Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Munich, Germany, May 8-11, 2000-GT-270
- W. Lou (2000)
Beitrag zur hochbelasteten Schaufelgrenzschicht
Dissertation TU Berlin
- A. B. Mehendale, J. C. Han, S. Ou, C. P. Lee (1994)
Unsteady Wake Over a Linear Turbine Blade Cascade With Air and CO₂ Film Injection: Part II – Effect on Film Effectiveness and Heat Transfer Distribution
ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 730-737
- S. Ou, J. C. Han, A. B. Mehendale, C. P. Lee (1994)
Unsteady Wake Over a Linear Turbine Blade Cascade With Air and CO₂ Film Injection: Part I – Effect on Heat Transfer Coefficient
ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 721-729
- M. J. Rigby, A. B. Johnson, M. L. G. Oldfield (1990)
Gas Turbine Rotor Blade Film Cooling With and Without Simulated NGV Shock Waves and Wakes
International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Brussels, 1990, 90-GT-78
- W. B. Roberts (1975)
The Effect of Reynolds Number and Laminar Separation on Axial Cascade Performance
ASME J. of Engineering for Power, Vol. 97, pp. 261-274
- M. Sautner, S. Clouser, J. C. Han (1992)
Determination of Surface Heat Transfer and Film Cooling Effectiveness in Unsteady Wake Flow Conditions
AGARD 80th Symposium, Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines, Oct. Anatalya, Turkey, Paper No. 6
- V. Schulte, H. P. Hodson (1996)
Unsteady Wake-Induced Boundary Layer Transition in High Lift LP Turbines
41st Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Birmingham, UK, 10-13.6., 96-GT-486
- H.J. Seo, J.S. Lee, P.M. Ligrani (1998)
The effect of injection hole length on film cooling with bulk flow pulsation
Int. J. of Heat and Mass Transfer 41, pp. 3515-3528
- M. Talan, J. Hourmouziadis (2002)
Das Wiederanlegen der Transienten Ablöseblase in Turbomaschinen
Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2002