

# Untersuchung von geometrischen Einflussparametern bei Grenzschichteinblasung an hochbelasteten Niederdruckturbinenprofilen am Wassertank

Th. Schumann, C. Kasper, S. Staudacher, J. Gier \*\*

Institut für Luftfahrtantriebe  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 6  
70569 Stuttgart

\*\* MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Strasse 665  
80995 München

## ÜBERSICHT

Im Rahmen des Lufo III – Programms (Luftfahrtforschungsprogramm 3) wird eine hochbelastete Niederdruckturbinenbeschauflung untersucht. Dies erfolgt an einer skalierten Versuchsbeschauflung in einem ebenen Wassertank. Durch die hohe aerodynamische Belastung der Beschauflung entsteht über die gesamte Schaufelsaugseite eine laminare und turbulente Ablösung, welche durch Grenzschichteinblasung zum Anliegen gebracht werden soll. Die Untersuchungen zielen auf die qualitative Darstellung der Einflüsse unterschiedlicher Ausblasekonfigurationen von Ausblasebohrungsdurchmesser und Bohrungsabstand. Mit Hilfe von Farbsonden werden auftretende Ablösegebiete bei statischer Grenzschichteinblasung visualisiert. Anhand der Messungen konnte die Wirksamkeit einer Grenzschichteinblasung am Flachwassertank gezeigt werden. Zudem ist es möglich die Auswirkungen verschiedener Ausblasegeometrien zu verdeutlichen.

## BEZEICHNUNGEN

d	[m]	Durchmesser
l	[mm]	Bohrungsabstand
L	[mm]	Saugseitenlänge
m	[‐]	Ausblaserate
M	[‐]	Ausblaserate
n	[‐]	Bohrungszahl
Re	[‐]	Reynoldszahl $L \cdot u / v$
s	[mm]	Sehnenlänge
t	[‐]	Teilung
T	[K]	Temperatur
u	[m/s]	Geschwindigkeit
x, y, z	[m]	Koordinatenrichtung
v	[m <sup>2</sup> /s]	kin. Zähigkeitsmaß von Wasser

$\alpha_1, \alpha_2$  [°] Profilwinkel  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte

### Indizes

$\infty$  [‐] Zuströmzustand  
c [‐] Ausblasebedingungen

## 1. EINLEITUNG

Durch steigenden Kosten- und Konkurrenzdruck im heutigen Triebwerksbau, sind die Triebwerkshersteller gezwungen, neuartige Konzepte zur Kostenreduzierung und Effizienzsteigerung zu entwickeln. Ein Ansatzpunkt ist die Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems über eine Reduzierung des Gesamtgewichts der Turbine. Unter den verschiedenen Möglichkeiten der Gewichtsreduzierung verspricht neben dem Einsatz neuer Werkstoffe auch eine Verringerung von Stufen- oder Schaufelzahl der Einzelkomponenten weitere Möglichkeiten. Besonders im Bereich der Niederdruckturbine als größtem integralen Bauteil eines Flugtriebwerks ist durch den Einsatz neuartiger aerodynamischer Konzepte großes Gewichtseinsparungspotential zu erwarten [1]. Moderne Niederdruckturbinen Beschauflungen erfahren dadurch deutlich größere Druckgradienten, da die Schaufelbelastung im Hinblick auf eine mögliche Schaufelreduzierung und damit Gewichtseinsparung, immer weiter erhöht wird. Werden die gegenwirkenden Druckgradienten im Verzögerungsbereich der Saugseite zu groß, kann die Grenzschicht diese nicht mehr überwinden und löst ab. Ablöseblasen oder vollständig abgelöste Grenzschichten führen zu erhöhten

Strömungsverlusten und damit einer Verringerung im Wirkungsgrad [2], [3]. Besonders bei Niederdruckturbinen treten diese Verlusteffekte verstärkt bei unterschiedlichen Flugzuständen auf. Grund hierfür ist die Auslegung für maximalen Wirkungsgrad unter Take-off Bedingungen und die Gefahr der Grenzschichtablösung im Reiseflug durch die dort herrschenden niedrigen Drücke und damit auch niedrigen Reynoldszahlen. Curtis et al. [4] stellt an Kaskadenversuchen an Niederdruckprofilen für einen Re-Zahl Bereich von  $Re = 70000$  bis  $400000$  dar. Durch eine Veränderung des Schaufeldesigns bei High – Lift Profilen lassen sich diese Verluste jedoch verringern. Weitere Möglichkeiten zur Profilgestaltung zeigen Howell et al [5] und Haselbach et al. [6]. Durch aerodynamische Profilierung kann die Belastung noch weiter erhöht, die Profilverluste jedoch im Vergleich herkömmlicher Profile verringert werden.

Durch die Steigerung der aerodynamischen Belastung kann jedoch über die Geometrie der Beschaufelung eine Grenzschichtablösung nicht mehr verhindert werden. Um die negativen Auswirkungen einer abgelösten Grenzschicht zu verringern, bestehen unterschiedliche passive wie aktive Möglichkeiten zur Grenzschichtkontrolle. Verschiedene dieser Kontrollmechanismen wurden bereits untersucht und deren Wirksamkeit gezeigt. Oberflächenveränderungen wie eine Erhöhung der Oberflächenrauhigkeit, Ramesh et al [7] oder Einbuchtungen nach dem Golfball-Prinzip, Lake et al. [8], verändern die Turbulenz der Strömung und erlauben somit die Grenzschicht zu stabilisieren. Auch haben statische Vortex Generatoren gezeigt, dass durch eine Interaktion mit der Grenzschicht Wirbelstrukturen ausbilden werden können, die dazu führen, dass eine Ablösung verhindert wird. Demgegenüber stehen die aktiven Grenzschichtkontrollmaßnahmen. Diese haben im Hinblick auf die passive Grenzschichtkontrolle (Rauigkeit, Vertiefung, etc.) den Vorteil, dass die Grenzschichtkontrolle je nach Notwendigkeit zu oder abgeschaltet werden kann. Dadurch können die reynoldszahlabhängigen Verluste der passiven Grenzschichtkontrolle durch vermehrte Wirbelbildung auch im Auslegungspunkt der Beschaufelung verhindert werden.

Neben der Möglichkeit energiearmes Fluid aus der Grenzschicht abzusaugen, konzentrieren sich die Untersuchungen seit mehreren Jahren auf die Beeinflussung durch Grenzschichteinblasung. Wirbelgeneratoren (Vortex generator jets) erzeugen durch gepulste oder ungepulste Einblasung Wirbelstrukturen, welche die Grenzschicht sehr effektiv beeinflussen [9]. Bons et al. [10] stellt die Abhängigkeiten der Einblasewinkel bei niedrigen Reynoldszahlen ( $Re \sim 25000$ ) auf die Grenzschicht dar. Er zeigt auf, dass Ausblasewinkel von  $30^\circ$  zur Profiloberfläche und  $90^\circ$  zur Strömung die besten

Auswirkungen auf das Wiederanlegen der Grenzschicht haben und deren Wirksamkeit bei gepulster und ungepulster Ausblasung. Gepulste Ausblasejets sind besonders effektiv, wenn eine dimensionslose Pulsfrequenz  $F^+$  einen Wert  $>0,1$  besitzt. Dies konnte auch bei Volino [11] an Kaskadentest mit einem Bohrungsdurchmesser von  $d = 0,8$  mm und einem Bohrungsabstand von  $l = 8,5$  mm bei niedrigen Re-Zahlen von  $Re = 25000$  gezeigt werden.

Obwohl zahlreiche Untersuchungen an Niederdruckturbinenschaufeln mit Ablöseblasen durchgeführt wurden, stellen wenige den Einfluss von Geometrieparametern wie Bohrungsdurchmesser oder Bohrungsabstand auf die Wirksamkeit der Grenzschichteinblasung dar. Der größte Teil der Arbeiten verwendet einen Bohrungsdurchmesser von 1mm mit einem Verhältnis von Bohrungsabstand zu -durchmesser von 10.

Im Bereich der Filmkühlung zeigen Brown und Saluja [12], dass bei verringerten Bohrungsabständen, eine Intensivierung der Strahlmischung und eine erhöhte Störung der Außenströmung festzustellen ist. Deinert [13] zeigt eine Beeinflussung von Ablöseblasen durch Filmkühlung an einer ebenen Platte.

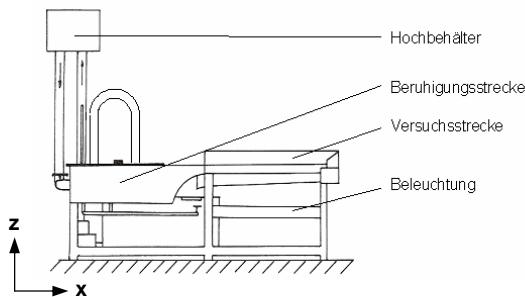
Es soll also in dieser Arbeit gezeigt werden, welcher Einfluss bei unterschiedlichen Bohrungsgeometrien zur aktiven Grenzschichtkontrolle zu erwarten ist.

## 2. Versuchsstand und Versuchsdurchführung Beschreibung des Versuchsstandes

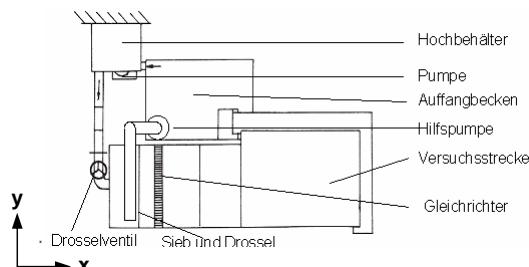
Für die nachfolgenden Untersuchungen ist der ebene Flachwasserkanal am Institut für Luftfahrtantriebe (ILA) der Universität Stuttgart verwendet worden. Der Kanal besteht aus einem geschlossenen Wasserkreislauf.

Der Aufbau des Versuchskanals ist in Abb.: 1 und Abb.: 2 zu sehen. Ein durch die Pumpe bereitgestellter Höhenunterschied zwischen dem Versuchsstand und dem Ansaugbehälter im oberen Bereich definiert den Druckunterschied im Wasser. Die Wassermenge wird über ein Drosselventil der Einlaufdüse bereitgestellt. Um eine hohe Zuströmgeschwindigkeit zu erreichen, wurde zusätzlich eine Hilfspumpe installiert, die es ermöglicht einen ausreichenden Massenstrom bereitzustellen, da der ursprüngliche Versuchsaufbau eine physikalische Grenze im Leerlaufen des Hochbehälters hat.

Die Zuströmung aus der Beruhigungsstrecke erfolgt durch zwei Wabenstrukturen, um eventuelle Turbulenzen zu unterbinden. Über eine Einlaufdüse, welche in einer senkrechten Ebene entlang der Hauptströmung in x – z Richtung konturiert ist, wird die Strömung zum Profil hin beschleunigt. Eine zweite Kontur in x – y Richtung ermöglicht die zusätzliche Beschleunigung der Strömung.



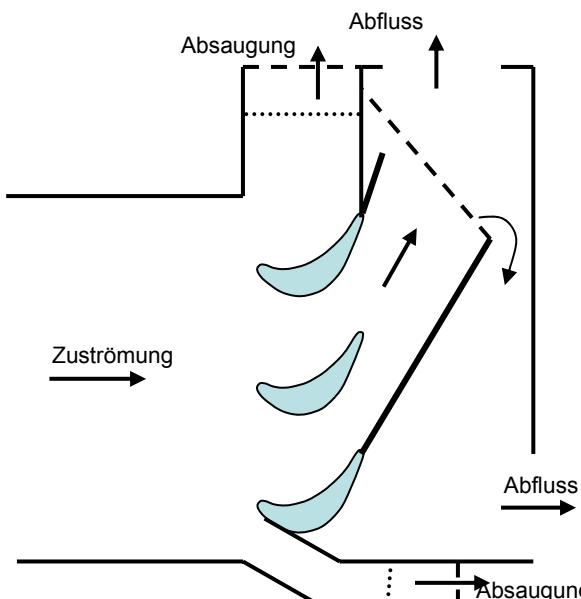
**Abb.: 1** Schematischer Aufbau des Versuchsstandes (Seitenansicht)



**Abb.: 2** Schematischer Aufbau des Versuchsstandes (Draufsicht)

Durch die lange Zulaufstrecke im Wasserkanal ist eine Grenzschichtabscheidung unter der Schaufelkaskade notwendig. Zusätzlich wird im Bereich der Schaufelkaskade die Seitenwandgrenzschicht von der Saugseite sowie der Druckseite der außen liegenden Schaufeln abgeführt (Abb. 3).

Die Menge des abgesaugten Grenzschichtmassenstroms kann über zwei im Abströmbereich eingebaute Wehre reguliert werden. Somit steht nicht der gesamte Massenstrom dem Versuchsbereich zur Verfügung.



**Abb.: 3** Schematische Darstellung der Versuchsstrecke

Durch die Forderung nach einem skalierten Profil mit hoher Sehnenlänge ist der Versuchsstand nur in der Lage drei Versuchsprofile aufzunehmen, wobei zwei davon zur Definition der Randbedingungen des Versuchsprofils vorgesehen sind. Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, sind die Hinterkanten der äußersten Schaufeln durch Platten in Strömungsrichtung verlängert.

Zur Drosselung der Strömung wird am Ende des Abströmbereiches ein Gitternetz verwendet. Dies bewirkt, dass die Stromlinien nicht zur Ausflussöffnung hin sich verändern, sondern parallel auf das Drosselgitter zufließen. Hinter der Drossel entsteht nur eine geringe Stromaufwirkung auf die Stromlinien, so dass das öffnen oder schließen eines Wehres nicht die Stromlinienlage verändert.

Der abfließende Massenstrom wird durch unterschiedliche Öffnungen im Kanal abgeführt. Der größte Anteil fließt über die in Strömungsrichtung liegende Öffnung ab, wohingegen ein kleinerer Anteil umgelenkt wird und hinter das Gitter gelangt und dort abfließt. Es ist sichergestellt, dass der um die Ecke abfließende Massenstrom keine Stromaufwärtswirkung bedingt.

Eine Einblasung im Profil wird über ein Schlauchsystem realisiert, welches über einen Hochbehälter gespeist ist. Über die Lage des Hochbehälters können unterschiedliche Massenströme und damit Ausblaseraten eingestellt werden.

### Beschreibung des Versuchsträgers

Im Rahmen des Lufo III Forschungsprogramms wurde in Kooperation mit der MTU Aero Engines GmbH eine Ultra High – Lift Niederdruckturbinenbeschaukelung ausgelegt. Diese wurde so gestaltet, dass sie definiert über den Bereich der Profilsaugseite ablöst [16]. Um Aussagen über das Verhalten der im Niedermachzahl Turbinenprüfstand zu untersuchenden Beschaukelung zu erhalten, wird für das Wasserkanalmodell der Mittelschnitt der Versuchsbeschaukelung (skaliert und als zylindrische Schaufel) erstellt. Die maßgeblichen Profildaten der Kaskade sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Definition der Strömungswinkel und der Kaskadenparameter sind in Abb.: 4 dargestellt. Die sich ergebende Profilform entspricht der Profilform der 50% Stromlinie der Schaufel. Dies ist notwendig, da im Niedermachzahl Turbinenprüfstand der mittlere Durchmesser aufgrund ansteigender Seitenwände nicht konstant ist, sondern sich vergrößert. Im Wasserkanal mit parallelen Seitenwänden muss diese Zuströmbedingung bei der Modellerstellung mit integriert werden.

Das Kaskadenmodell besitzt eine Schaufelhöhe  $h$  von  $h = 100 \text{ mm}$ .

L	$\alpha_1$	$\alpha_2$	s	t
120 mm	35 °	64 °	86 mm	135 mm

Tabelle: 1 Profildaten

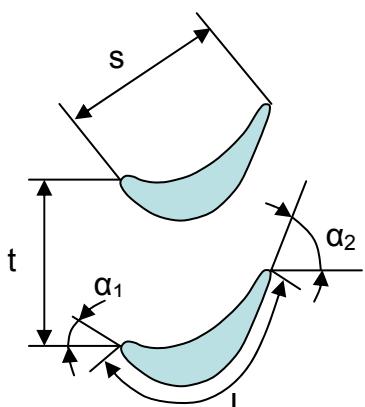


Abb.: 4 Profilgeometrie

Für die vorliegenden Untersuchungen, werden die Kaskadenprofile mit Einblasebohrungen versehen. Diese sind bei 44% der Saugseitenlänge positioniert (Abb. 5). Damit wird die Grenzschicht durch die Einblasung stromauf der laminaren Ablösestelle gestört, um einen laminar – turbulenten Umschlag zu erzeugen. Bezogen auf die Saugseitenlänge befindet sich die Einblaseposition 5% vor der laminaren Ablösestelle. Der Einblasewinkel beträgt 90° zur Profiloberfläche.

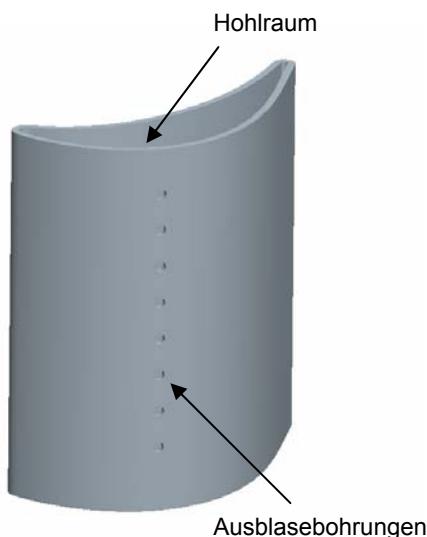


Abb.: 5 Schaufelkaskade im Wasserkanalmodell

Über die Schaufelhöhe sind 3 bzw. 8 Bohrungen, entsprechend der Konfiguration angebracht. Bei Bohrungsdurchmessern von 1mm und 3 mm ergeben sich damit ein  $l/d$  von 2,33 sowie von 10.

Zur Bestimmung der lokalen Position und Erfassung von Veränderungen der abgelösten Grenzschicht bei Einblasung und Geometrieveränderungen, ist das

eingesetzte Versuchsprofil mit einem Referenzgitter überzogen, welches einen Gitterabstand von 5mm besitzt.

### 3. Messtechnik und Visualisierungsmethoden

In der Untersuchung wurden unterschiedliche Visualisierungsmethoden zum Einsatz gebracht, wie sie auch in Vogt et al. [14] vorgestellt werden. Zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten, wurden Pulsgeneratoren sowie eine Stauscheibe nach John et al. [15] eingesetzt. Bei der Geschwindigkeitsbestimmung über den Pulsgenerator wird ein laminarer Farbfaden durch eine Freistromsonde in den zu untersuchenden Bereich der Strömung eingebracht und mittels Pulsgenerator entsprechend mit Pulsen versehen. Diese werden per Kamera aufgenommen. Aus dem geometrischen und zeitlichen Abstand der Pulse zueinander lässt sich die eingestellte Strömungsgeschwindigkeit bestimmen. Mit diesem Verfahren wird eine Stauscheibe kalibriert. Bei den weiteren Messungen wird die Strömungsgeschwindigkeit über die Stauscheibe bestimmt. Zur Visualisierung von Wandstromlinien wurde das Versuchsprofil mit einer Bohrungsreihe zur Farbeinbringung im Bereich der Saugseitenvorderkante ausgestattet. Ablösegebiete wurden mit einer Farbhandsonde angefärbt. Alle Strömungsphänomene werden mit einer Videokamera über ein Spiegelsystem zeitgleich in einer Ober- und Seitenansicht aufgenommen. Damit kann sichergestellt werden, dass Strömungseffekte, die zwischen den Kaskaden sichtbar werden, auch radial zugeordnet werden können.

### 4. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Die hier vorgestellten Untersuchungen befassen sich mit der experimentellen Untersuchung des Strömungsfeldes in der Grenzschicht eines hoch belasteten Schaufelprofils. Es tritt auf der Saugseite aufgrund eines stark positiven Druckgradienten eine laminare Ablöseblase auf. Durch Einblasung im Bereich vor der Ablöseblase ist es möglich, einen laminar-turbulenten Grenzschichtumschlag zu erzeugen, welcher zum Wiederaufladen der Ablöseblase führt. Um sicher zu stellen, dass keine ungewünschte Interaktion mit einer Seitenwandgrenzschicht auftritt, wird diese vor Auftreffen auf den Versuchskanal abgesaugt.

### Versuchsrandbedingungen

Die für die Untersuchung eingestellten Versuchsrandbedingungen werden in Tabelle: 2 zusammengefasst.

$u_\infty$ [m/s]	T [°C]	$v$ [ $m^2/s$ ]	$Re_L$ [-]
0,2	25	$1,013 \cdot 10^{-6}$	17000

Tabelle: 2 Versuchsbedingungen

Die Reynoldszahl ist mit der Zuströmgeschwindigkeit und der Saugseitenlänge gebildet. Die Ausblaserate M bestimmt sich über das Verhältnis von Dichte und Geschwindigkeit des eingeblasenen Fluids zur Haupströmung

$$M = \frac{\rho_c \cdot U_c}{\rho_\infty \cdot U_\infty}$$

Für eine Bestimmung der Ausblaserate M wurde der experimentelle Ausblasemassenstrom in Bezug auf die Ausblasefläche gesetzt und berechnet.

Aufgrund der zur Visualisierung der Zuströmung eingesetzten Farbfäden kann davon ausgegangen werden, dass die Zuströmung laminar ist. Dies bestätigt die Annahme einer niedrigen Freistromturbulenz. Wird das Abströmgebiet nach der Schaufelkaskade betrachtet, so kann festgestellt werden, dass der Abströmwinkel stark von den beiden strömungsführenden Seitenwänden abhängig ist. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Seitenwände einen entscheidenden Einfluss auf den sich einstellenden Abströmwinkel haben. Daher ist es notwendig, die Seitenführungswand entsprechend des sich auf dem Versuchsprofil einstellenden Abströmwinkels nachzustellen. Die entsprechenden Nachstellwinkel ergeben sich aus einem empirischen Mittel aus dem sich auf der Saugseite des Versuchsprofils einstellenden Strömungswinkel und einer Annahme über die, sich an der Seitenführungswand aufbauende Grenzschicht.

Für die Messungen werden die Messreihen entsprechend Tabelle: 3 untersucht.

Messreihe	d [mm]	l/d [-]	n
1	0	0	0
2	1	10	8
3	3	10	3
4	3	2,33	8

Tabelle: 3 Messreihen

Um die Messergebnisse anschaulich machen zu können, wird zunächst die gesamte Oberfläche der Schaufelsaugseite gemäß Abb.: 6 in vier Teilgebiete unterteilt:

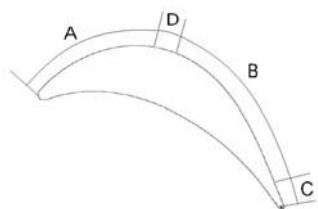


Abb.: 6 Versuchsprofil mit Definitionsbereichen

- Bereich A : laminare Grenzschicht
- Bereich B: Bereich laminarer sowie turbulenter Ablösung
- Bereich C : turbulente Ablösung
- Bereich D : Einblasung

Der Bereich der laminaren Zuströmung A, sowie der Bereich um die Ausblasebohrungen D werden in der Untersuchung nicht betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass die Strömungsablösung hinter den Ausblasebohrungen beginnt. Der eingebrachte Massenstrom wirkt als Strömungsversperrung und damit Veränderung des ungestörten Grenzschichtprofils.

### Versuchsergebnisse

Um die qualitativen Unterschiede des sich einstellenden Strömungsfeldes bei sich verändernden Einblasegeometrien herauszustellen, wurde eine vergleichende Analyse durchgeführt. Es soll keine quantitative Abschätzung über unterschiedliche Ausblaserraten und deren Einfluss infolge einer Geometrieänderung auf das Strömungsfeld gegeben werden. Vielmehr ist die Höhe der Ausblaserate über den maximal zu realisierenden Ausblasemassenstrom am Versuchsstand begrenzt

Abb.: 7a) zeigt den Bereich B und C der Versuchsbeschaufelung bei  $M = 0.0$ . Die blau abgefärbten Bereiche stellen das Rezirkulations- und Ablösegebiet dar.

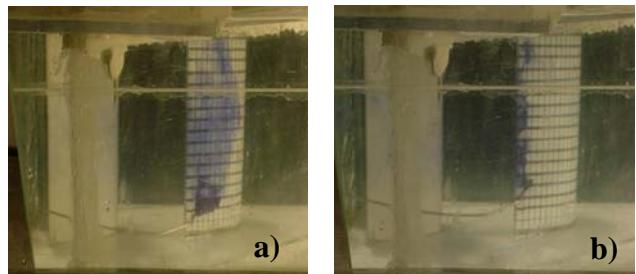


Abb.: 7 d = 1 mm l/d = 10, a)  $M = 0.0$  b)  $M = 2,54$

Die Grenzschicht löst bei etwa 60% der Saugseitenlänge über die gesamte Schaufelhöhe ab. Dieses Grenzschichtverhalten kann bei jeder Bohrungskonfiguration beobachtet werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass beim vorliegenden Versuchsaufbau, die Form der Einblasebohrungen keinen Einfluss auf die Ausprägung der Grenzschichtablösung im unbeeinflussten Fall hat.

Ausgehend von dieser wird in Messreihe 2 über 8 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm und einem l/d von 10 eingeblasen. Es stellt sich eine rechnerische Ausblasrate von  $M = 2.54$  ein. Abb.: 7b) zeigt die Strömungsablösung bei Messreihe 2. Hier zeigt sich ein vollständiges Wiederanlegen der Strömung im Bereich B. Die Größe des Bereiches C mit permanenter turbulenter Ablösung beträgt etwa 5% der Saugseitenlänge. Die Versuche zeigen bei Konfiguration 2 gute Beeinflussungsmöglichkeiten bei hohen Ausblaserraten.

Im folgenden Versuch wird der Durchmesser der Ausblasebohrungen von  $d = 1\text{mm}$  auf  $d = 3\text{mm}$

vergrößert. Um ein  $I/d = 10$  beizubehalten, ist die Anzahl der Löcher auf  $n = 3$  verringert worden. Die Auswirkungen auf das Strömungsfeld sind in Abb.: 8 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass bei einer Ausblaserate von  $M = 0,81$  die Einblasung in die Grenzschicht einen nur geringen Einfluss hat.

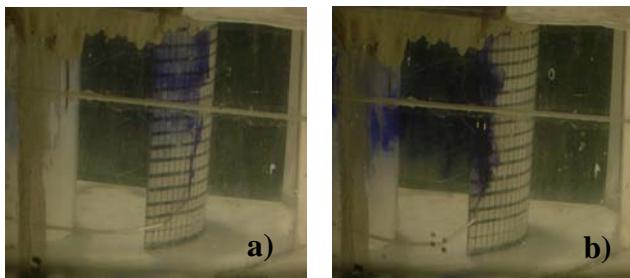


Abb.: 8  $d = 3 \text{ mm}$   $I/d = 10$ , a)  $M = 0,81$  b)  $M = 1,27$

Auffällig ist die stark unsymmetrische Ausprägung des Ablösegebietes. Auf Höhe der mittleren Ausblasebohrung kann eine lokale Beeinflussung der Ablöselinie visualisiert werden. Diese ist auf die Veränderung des Strömungsfeldes durch die stromauf platzierte Ausblasung zurückzuführen. Offensichtlich reicht bei dieser Ausblasrate die lokale Störung der Strömung an der Ausblasestelle nicht aus, um die gesamte Grenzschicht zum Anliegen zu bringen. Eine Interaktion der Ausblasungen miteinander ist bei einer Erhöhung der Ausblasrate auf  $M = 1,27$  zu erkennen. Dies ist in Abb.: 8 b) dargestellt. Die abgelöste Grenzschicht kann stromab den Ausblasebohrungen bis hin zum Bereich C wieder zum Anliegen gebracht werden. Die Zwischenbereiche werden durch Mischungseffekte ebenfalls beeinflusst, jedoch nicht so stark wie bei einem kleineren  $I/d$  oder einem geringeren absoluten Abstand der Ausblasebohrungen zueinander. Es ist anzunehmen, dass im vorliegenden Fall, der Einfluss einer statischen Versperrung der Strömung im Bereich vor einer Grenzschichtablösung bei geringen Einblasraten dominiert. Dies belegt auch die Erhöhung der Bohrungszahl von  $n = 3$  auf  $n = 8$  entsprechend Messreihe 4.

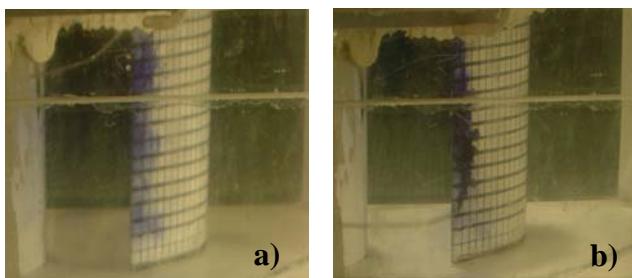


Abb.: 9  $d = 3 \text{ mm}$   $I/d = 2,33$ , a)  $M = 0,30$  b)  $M = 0,48$

Schon bei sehr geringen Ausblasraten ist eine deutliche Beeinflussung der Strömung sichtbar. Die Ausblasrate in Abb.: 9 a) beträgt  $M = 0,30$ . Die

Strömungsablösung ist entgegen Messreihe 3 schon bei sehr niedrigen Einblasraten wirksam. Auffällig ist jedoch eine stark wellenlinienförmige Ablöselinie die durch die lokalen Effekte der Einblasebohrungen herrührt, wie schon in Messreihe 3 gezeigt. Im Vergleich von Messreihe 4 mit erhöhter Einblasrate, kann die Ablösung bei einer Einblasrate von  $M = 0,48$  (Abb.: 9 b)) weiter reduziert werden. Auffällig ist jedoch, dass auch bei dieser Ausblasekonfiguration, die Ablösung nicht vollständig vermieden werden kann. Einschließlich des Strömungsbereiches B und C beträgt die Ablösung etwa 10 % der Saugseitenlänge. Dies legt den Schluss nahe, dass die durch das geringe  $I/d$  von  $I/d = 2,33$  entstehende Versperrung der Strömung die Grenzschichtströmung stark beschleunigt. Es ist also schon bei niedriger Einblasrate eine deutliche Veränderung des Ablöseverhaltens zu sehen.

Betrachtet man die beiden geometrischen Einflussfaktoren Bohrungsdurchmesser und  $I/d$  getrennt voneinander, so kann gesagt werden, dass eine Vergrößerung des Ausblasendurchmessers bei gleich bleibendem  $I/d$  keinen Einfluss auf die Beeinflussbarkeit einer Grenzschichtablösung hat. Bei gleich bleibender Ausblasrate kann die Grenzschichtablösung effektiv verringert werden. Einzig der höhere notwendige Einblasemassenstrom spricht gegen eine Verringerung der Bohrungszahl. Anders das Verhältnis  $I/d$ . Hier bewirkt eine Verringerung eine deutliche Verbesserung der Beeinflussbarkeit, schon bei geringen Ausblasraten und somit auch geringeren Ausblasemassenströmen. Somit konnten ähnliche Auswirkungen auf die Strömung festgestellt werden, wie sie Brown et al. [12] aufzeigt.

Es ist noch anzumerken, dass eine Grenzschichtveränderung durch Einblasung nicht einzig über die geometrischen Einflussparameter beschrieben werden kann. Viel mehr muss über eine Kombination aus Strömungs- und geometrischen Einflussfaktoren, da die Ausblasrate und das Impulsverhältnis bei Einblasung ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der Grenzschichtablösung haben.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Modell einer Niederdruckturbinenbeschaufelung mit Ablösung im Flachwasserkanal des Instituts für Luftfahrtantriebe untersucht. Die Untersuchungen wurden bei einer Reynoldszahl von  $Re \sim 17000$  durchgeführt. Es sollte herausgestellt werden, welchen Einfluss unterschiedliche Einblasegeometrien, zur Grenzschichtbeeinflussung aufzeigen. Untersucht wurde neben dem Ausblasebohrungsdurchmesser ebenfalls das dimensionslose

Verhältnis von Bohrungsabstand zu Ausblasedurchmesser.

Die Grenzschichtablösung und deren Ausprägung wurden mittels Farbeinbringung sichtbar gemacht. Es konnte gezeigt werden, dass durch Einbringen eines Massenstroms quer zur Hauptströmung, ein Wiederanlegen der Grenzschicht erfolgt. Durch das Ausblasen vor der Grenzschichtablösung wird die Grenzschicht gestört und turbuliert, so dass eine laminare Ablösung verhindert werden kann. Der Masseneintrag reicht im vorliegenden Fall jedoch nicht aus, die Grenzschicht soweit zu energetisieren, um eine auftretende turbulente Grenzschichtablösung im Bereich der Schaufelhinterkante vollständig zu verhindern.

Für die Beeinflussung der Grenzschicht ist die Ausblasrate der entscheidende Faktor. Es konnte gezeigt werden, dass bei Verringerung des  $l/d$  schon bei geringen Ausblasraten ein vollständiges Wiederanlegen der Grenzschicht zu erreichen ist. Der Einfluss des Bohrungsdurchmessers konnte nur insofern festgestellt werden, dass die dadurch entstehenden lokalen Grenzschichtstrukturen, wie Mischungsbereiche zwischen Haupt- und Einblasemassenstrom lokal auseinander gezogen werden.

Da aufgrund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, der absolute Masseneintrag eine entscheidende Rolle spielt, hat eine Einblasung mit kleinem  $l/d$  und damit mehr Ausblasebohrungen Vorteile gegenüber einem großem  $l/d$ . Beim Vergleich von  $l/d = 2,33$  zu  $l/d = 10$  werden bei geringeren Ausblasraten und damit kleineren absoluten Massenströmen deutlich bessere Ergebnisse erzielt.

## 7. LITERATUR

- [1] Ardey, S. Gier, J., Hübner, N. „Kostenreduktion durch neue aerodynamische Konzepte bei Niederdruckturbinen“, DGLR Jahrestagung 2000
- [2] Hourmouziadis, J., „Aerodynamic Design of Low Pressure Turbines“, AGARD LS 167, 1989
- [3] Mayle, R.E.; „The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines“, ASME J. of Turbomachinery, 113, pp. 509 – 537, 1991
- [4] Curtis, E.M., Hodson, H.P., Banieghal, M.R., Denton, J.D., Howel, R.J., Harvey, N.W., „Development of Blades for Low Pressure Turbine Applications“, ASME Turbo Expo, 96-GT-358, 1996
- [5] Howell, R.J., Ramesh, O.N., Hodson, H.P., Harvey, N.W., Schulte, V., „High Lift and Aft Loaded Profiles for Low Pressure Turbines“, ASME Turbo Expo, 2000-GT-261, 2000
- [6] Haselbach, F., Schiffer, H.-P., Horsmann, M., Dressen, S., Harvey, N., Read, S., „The Application of Ultra High-Lift Blading in the BR715 LP Turbine“, J. of Turbomachinery, vol.124, pp. 45 – 51, January 2002
- [7] Ramesh, O.N., Hodson, H.P., Harvey, N.W., „Separation control in ultra high lift airfoils by unsteadiness and surface roughness“, ISABE-2001-1096, 2001

- [8] Lake, L.P., King, P.I., Rivir, R.B., „Reduction of Separation losses on a turbine Blade with Low Reynolds Number“, AIAA Paper, AIAA-99-0242, 1999
- [9] Sondergaard, R., Bons, J. P., Sucher, M., Rivir, R.B., „Reducing Low-Pressure Turbine Stage Blade Count using Vortex Generator Jet Separation Control“, ASME Turbo Expo, GT-2002-30602, 2002
- [10] Bons, J.P., Sondergaard, R., Rivir, R.B., „The Fluid Dynamics of LPT Blade Separation Control using Pulsed Jets“, ASME Turbo Expo, 2001-GT-0190, 2001
- [11] Volino, R.J., „Separation Control on Low Pressure Turbine Airfoils using Synthetic Vortex Generator Jets“, ASME Turbo Expo, GT2003-38729, 2003
- [12] Brown, A., Saluja, C.L., „Film cooling form a single Hole and a Row of Holes of variable Pitch to diameter ratio“ Int. J. of Mass and Heat Transfer, Vol. 22, pp. 525 – 533, 1979
- [13] Deinert , B.; Hourmouziadis, J.; „Filmkühlungsuntersuchungen in instationärer Strömung mit Ablöseblasen“, DGLR – 2003 -204, 2003
- [14] Vogt, Hans-Frieder; Zippel, Manfred: „Sekundärströmungen in Turbinengittern mit geraden und gekrümmten Schaufeln; Visualisierung im ebenen Wasserkanal“. Forschung im Ingenieurwesen – Engineering Research, 62(9):247-253, September 1996.
- [15] John, Jens; Wagner, Ralf, „Sekundärströmungen in Turbinengittern; Untersuchung des Einflusses der Schaufellänge auf die Ausbildung des Ablösebereichs und des Wirbelsystems“, Studienarbeit, 1992
- [16] Schumann, T., „Auslegung einer aerodynamisch hochbelasteten Beschaufelung für Untersuchungen von Grenzschicht stabilisierenden Ausblasekonfigurationen“, Diplomarbeit, Stuttgart, 2004