

# VERMESSUNG DER ANSTRÖMUNG UND DER LAMINAREN ABLÖSEBLASE AN EINER VERDICHTERKASKADE MIT ZEITAUFGELÖSTER PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

R. van Rennings, Fachgebiet Aerodynamik, Institut für Luft- und Raumfahrt, Technische Universität Berlin, Marchstraße 12-14, 10587 Berlin, Deutschland

## Zusammenfassung

Die Anströmbedingungen und der Bereich der Transition über eine laminare Ablöseblase einer hochbelasteten Verdichterkaskade wurden mit der Methode der zeitaufgelösten Particle Image Velocimetry untersucht. Um die Streuung des auftreffenden Lichtschnitts in Oberflächennähe zu minimieren, wurde eine reflektierende Oberflächenbeschichtung verwendet und eine Vorverarbeitung der Rohbilddaten durchgeführt. Diese Methoden ermöglichten es, bessere Ergebnisse der Particle-Image-Velocimetry-Auswertung in der Nähe der Schaufeloberfläche zu erzielen. Anhand der gemittelten Auswertung der zeitaufgelösten Particle-Image-Velocimetry-Messungen konnten geometrische Parameter der laminaren Ablöseblase bestimmt werden. Um kohärente Strukturen aus den instationären Daten innerhalb der laminaren Ablöseblase zu detektieren, wurde ein wavelet-basiertes Wirbeldetektionsverfahren entwickelt und auf die Messdaten angewendet.

## Nomenklatur

$\beta$	Strömungswinkel	[°]
$\gamma$	Staffelungswinkel	[°]
$\lambda_{\text{scale}}$	Vortlet-Durchmesser	[m]
$h$	Schaufelhöhenkoordinate	[m]
$H$	Schaufelhöhe	[m]
$L_c$	Sehnenlänge	[m]
$r$	Radius	[m]
$s$	Saugseitenkoordinate	[m]
$S$	Saugseitenlauflänge	[m]
$t$	Zeit	[s]
$T$	Teilung	[m]
$u, v$	Geschwindigkeitskomponenten	[m/s]
$u', v'$	Schwankungsgeschwindigkeiten	[m/s]
$u_\phi$	Umfangsgeschwindigkeit	[m/s]
$x, y, z$	kartesische Koordinaten	[m]

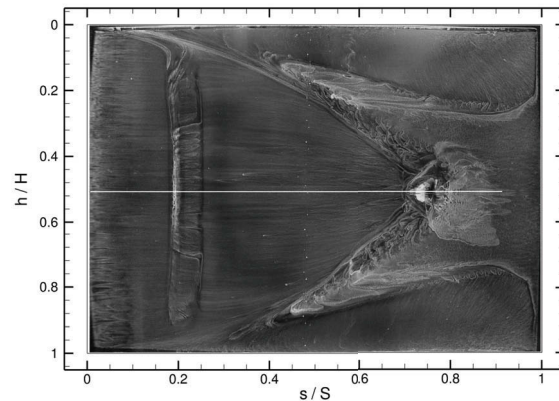


BILD 1: Ölanstrichbild der Schaufelsaugseite nach [1]

## 1 EINLEITUNG

In den Forschungsprojekten TATMo und TFB<sup>RRD</sup> wurde anhand einer Statorkaskade untersucht, auf welche Weise sich Maßnahmen zur aktiven Strömungskontrolle in nicht-rotierenden Teilen von Turbomaschinen realisieren lassen. Im Rahmen dieser Projekte wurden interdisziplinäre Untersuchungen der Umsetzbarkeit von Aktuator- und Regelungskonzepten sowie der numerischen Implementierung von aktiven Maßnahmen zur Strömungskontrolle durchgeführt [1] [2] [3] [4] [5]. Basis solcher Untersuchungen ist der Vergleich von numerisch und experimentell gewonnenen Ergebnissen.

Ziel der vorgestellten Arbeit ist, mit der Methode der zeitaufgelösten Particle Image Velocimetry (TR-PIV) die Anströmbedingungen zu validieren. Des Weiteren werden TR-PIV Messungen in der Nähe der Schaufelsaugseitenoberfläche gemacht, um die Dynamik innerhalb der laminaren Ablöseblase zu erfassen.

Zu diesem Zweck wurden Methoden zur Verbesserung der Bildqualität im Bereich des auftreffenden Lichtschnitts auf der Schaufeloberfläche angewendet.

Das Strömungsfeld der Verdichterkaskade ist im Wesent-

lichen durch drei Strömungsphänomene gekennzeichnet, welche im Ölanstrichbild der Schaufelsaugseite deutlich erkennbar sind (siehe Bild 1). Es handelt sich dabei um die laminare Ablöseblase, die Eckenwirbel innerhalb der Passage und die druckinduzierte Hinterkantenablösung. Aufgrund der hohen Geschwindigkeitsgradienten in der Grenzschicht der Schaufelsaugseite, stellen sich TR-PIV-Messungen in Oberflächennähe als Herausforderung dar.

Wie in Bild 1 erkennbar, findet die Grenzschichttransition auf der Saugseite der Schaufel über laminare Ablöseblasen statt. Auf der Druckseite der Verdichterschaukeln befindet sich ebenso eine Ablöseblase direkt im Anschluss zur Vorderkante, die eine Ausdehnung von wenigen Prozent der Druckseitenlauflänge hat. Die laminare Ablöseblase auf der Saugseite befindet sich ca. zwischen 17 und 25% der Saugseitenlauflänge (vgl. Bild 1). Die Ablöseposition der Ablöseblasen ist fixiert durch den von der Geometrie des Schaufelgitters aufgeprägten Druckgradienten. Im Bereich des Mittelschnitts ist die Strömung um die Statorschaukel quasi zweidimensional.

Ab der Position der laminaren Ablöseblase auf der

Saugseite beginnt der Durchmesser der Eckenwirbel zu wachsen. Aufgrund der Verblockung der Passage durch die Sekundärströmung und den Impulsverlust innerhalb der Grenzschicht, verursacht durch die laminare Ablöseblase, wird die Passagenströmung nicht ausreichend verzögert und es kommt zu einer druckinduzierten Ablösung bei ca. 70% der Saugseitenlauflänge (vgl. Bild 1).

Der Mechanismus der Transition über laminare Ablöseblasen tritt bei Strömungen kleiner Reynolds-Zahlen mit geringen Turbulenzgraden der Hauptströmung auf, die mit einem positiven Druckgradienten in Strömungsrichtung beaufschlagt sind. Es muss zwischen der stationären - also zeitlich gemittelten - und instationären Betrachtungsweise unterschieden werden. Die stationäre Form einer laminaren Ablöseblase ist durch ein räumlich begrenztes Rückstromgebiet in Oberflächennähe gekennzeichnet. Durch die Verdrängung des impulsarmen Fluids ist in Druckverteilungen ein charakteristisches Plateau erkennbar. Horton gibt in [6] ein Modell der Form von Druckplateaus laminarer Ablöseblasen und Gaster stellte in [7] seine Untersuchung zur Rezeptivität laminarer Ablöseblase vor. Zusätzlich schlägt er ein Kriterium zur Kategorisierung laminarer Ablöseblasen in lange und kurze vor. Diese unterscheiden sich durch ihre Länge, aber auch durch ihre Rezeptivität bzgl. äußerer Störungen.

Bei der instationären Betrachtungsweise werden instantane Wirbelstrukturen im Bereich der laminaren Ablöseblase untersucht. So können in instantanen Geschwindigkeitsfeldern laminarer Ablöseblasen meist keine Rückstromgebiete - wie sie für die stationäre Betrachtung charakteristisch sind - erkannt werden. In der Literatur wird beschrieben, wie im Bereich der laminaren Ablöseblase instationär Wirbel aufrollen und anschließend zerplatzen. Der Anstieg von Reynolds-Scherspannungen im Bereich der laminaren Ablöseblase wird mit dem Beginn des Wirbelaufrollens verbunden.

Weitere experimentelle und numerische Untersuchungen, den Charakter laminarer Ablöseblasen betreffend, wurden unter anderem in [8], [9], [10], [11], [12], [13] und [14] veröffentlicht.

## 2 GEOMETRIE UND RANDBEDINGUNGEN

Die Geometrie der Statorkaskade wurde von Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG zur Untersuchung von Konzepten aktiver Strömungskontrolle in Turbomaschinen ausgelegt. Es handelt sich um ein sogenanntes Controlled-Diffusion-Profil, welches eine besonders hohe Umlenkung und damit Verzögerung der Strömung realisieren soll. Das Profil wurde zweidimensional überkritisch für eine Umlenkung der Strömung von  $\Delta\beta = 60^\circ$  ausgelegt. Bild 2 zeigt das Profil der Kaskadenschaufeln und weitere Parameter der Geometrie. Um verschiedene Aktuatorkonzepte in die Endwände und die Schaufeln der Kaskade integrieren zu können, wurde die gesamte Geometrie skaliert. Die resultierenden Abmessungen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Durch die geringe Streckung der Kaskadenschaufeln haben sekundäre Strömungsstrukturen einen hohen Einfluss auf die Passagenströmung.

Die Reynolds-Zahl, bei der die Messungen an der Stator-kaskade durchgeführt wurden, beträgt  $Re = 840\,000$  bezo-

gen auf die Sehnenlänge. Aus der Anströmgeschwindigkeit und der Temperatur der Anströmung ergibt sich eine Mach-Zahl von  $Ma = 0.1$ . Die Strömung durch die Kaskade kann daher als inkompressibel betrachtet werden.

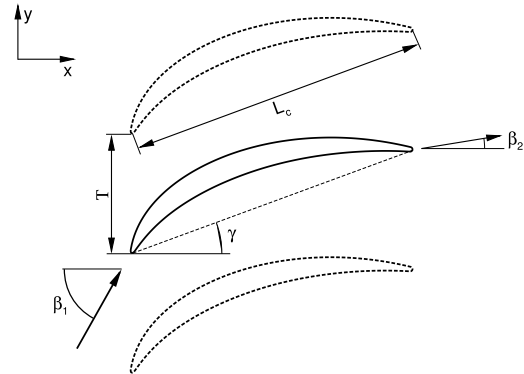


BILD 2: Geometrie der Statorkaskade

Variable		Wert	Einheit
Sehnenlänge	$L_c$	0.375	[m]
Schaufelhöhe	$H$	0.3	[m]
Relative Schaufelhöhe	$H/L_c$	0.8	[1]
Teilung	$T$	0.15	[m]
Relative Teilung	$T/L_c$	0.4	[1]
Saugseitenlauflänge	$S$	0.42	[m]
Staffelungswinkel	$\gamma$	20.0	[°]
Anströmwinkel	$\beta_1$	60.0	[°]
Abströmwinkel	$\beta_2$	0.0	[°]

TAB 1: Geometrische Größen der Statorkaskade

## 3 VERSUCHSAUFBAU

Zur Durchführung der Untersuchungen von Konzepten aktiver Strömungskontrolle an der Statorkaskade wurde am Institut für Luft- und Raumfahrt der Technischen Universität eine Gittermessstrecke aufgebaut. Das Statorgitter besteht aus sieben Verdichterschaufeln, deren mittlere Schaufel mit Drucksensoren ausgestattet ist. Über Drehscheiben kann der Anströmwinkel des Statorgitters verändert werden. Mittels Druckbohrungen an den Endwänden des Prüfstandes kann die gleichmäßige Anströmung der Schaufeln kontrolliert werden. Mit einer Grenzschichtabsaugung und Leitblechen, jeweils an der oberen und unteren Wand, können die gleichmäßigen Zuströmbedingungen aller Verdichterschaufeln eingestellt werden. Bild 3 zeigt ein Foto und eine Skizze der Messstrecke mit den Einrichtungen zum Überprüfen und Einstellen der Anströmbedingungen.

Das Modell einer linearen Kaskade wird aus der Transformation von Zylinderkoordinaten einer axialsymmetrischen Turbomaschine auf kartesische Koordinaten hergeleitet. Dabei entspricht die  $x$ -Achse des Experiments der Maschinenachse, die  $y$ -Achse der Umfangskoordinate und die  $z$ -Achse der radialen Koordinate des Zylinderkoordinatensystems. Der Ursprung des kartesischen

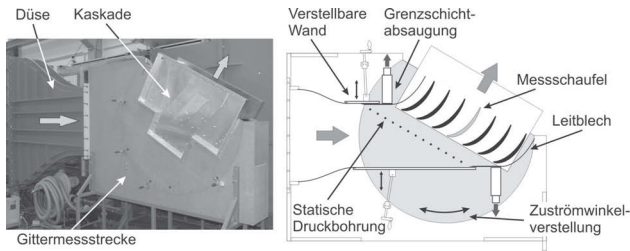


BILD 3: Kaskadenprüfstand nach [15]

Koordinatensystems des Experiments wurde in die Vorderkante der Messschaufel gelegt.

Für die Messungen der Anströmung wurde eine feste Position innerhalb der  $x$ - $y$ -Ebene gewählt. Hierbei wurde das PIV-System so installiert, dass eine Translation des gesamten Systems in spannweitischer Richtung ermöglicht wurde. Die Anströmung wurde in zwei unterschiedlichen spannweiten Ebenen vermessen, um Aussagen über eine mögliche spannweite Änderung der Anströmbedingungen treffen zu können. Eine Messung wurde im Mittelschnitt durchgeführt und eine zweite in Endwandnähe, bei einer relativen Schaufelhöhe von  $h/H = 0.94$ .

Für die Messungen der laminaren Laufstrecke wurde der Messbereich so gewählt, dass sowohl die Vorderkante als auch die laminare Ablöseblase erfasst wurden. Die Messebene des TR-PIV-Systems wurde hierfür auf eine spannweite Position von  $h/H = 0.47$  eingestellt.

Die Messungen der laminaren Ablöseblase konzentrierten sich nur auf den Bereich der laminaren Ablöseblase. Der Bildausschnitt der Hochgeschwindigkeitskamera wurde so ausgerichtet, dass die Ablöseblase vollständig erfasst werden konnte. Die Messungen der laminaren Ablöseblase fanden in Mittelschnittnähe bei einer relativen spannweiten Position von  $h/H = 0.44$  statt. Wie Bild 1 zu entnehmen ist, befinden sich die Messungen der laminaren Lauflänge und der laminaren Ablöseblase im Bereich der quasi-zweidimensionalen Grenzschichtströmung. Bild 4 zeigt die drei Positionen in der  $x$ - $y$ -Ebene, an denen die Messungen durchgeführt wurden.

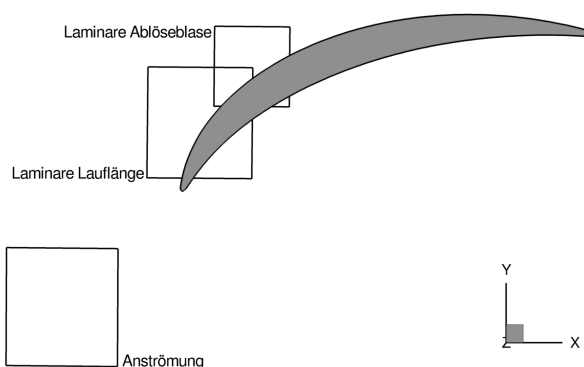


BILD 4: Messpositionen in Bezug auf die Statorschaufel

Das verwendete Hochgeschwindigkeits-PIV-System bestand aus einem Zweikavitäten-Nd:YLF-Laser<sup>1</sup> Darwin

<sup>1</sup>Nd:YLF: Neodym-dotiertes Yttrium-Lithium-Fluorid

PIV-80 des Hersteller Quantronics, einem optischen Arm mit Zylinderlinsen-Optik und einer Hochgeschwindigkeits-CMOS-Digitalkamera Photron Ultima APX-RS des Herstellers Photron. Der Laser emittierte grünes Licht der Wellenlänge 527 nm bei einer mittleren Pulsweite von 120 ns. Die Auflösung der Kamera betrug  $1024 \times 1024$  Pixel bei einer maximalen Abtastrate von 3000 Hz und 256 Grauwerten. Als Partikel wurden DEHS-Öltröpfchen<sup>2</sup> mit einem mittleren Durchmesser von  $\approx 1 \mu\text{m}$  verwendet. Die Partikel wurden der angesaugten Luft im Einlass und mit einem Düsenrechen in der Beruhigungskammer des Windkanals zugegeben, um mit möglichst wenig Partikeln eine hohe Partikeldichte auf einem spannweiten Schnitt zu erzeugen. Um störende Streuungen des auftretenden Lichtschnitts in Oberflächennähe zu reduzieren wurden eine mattschwarze und eine reflektierende Oberflächenbeschichtung untersucht. Als besser geeignet für TR-PIV-Messungen im Bereich von Grenzschichten erwies sich die reflektierende Beschichtung, da das Licht in Richtung des einfallenden Lichtschnitts reflektiert wird. Auf diese Weise konnten die Streuungen in Richtung der Hochgeschwindigkeitskamera wirksam reduziert werden (vgl. Hecklau et al. [15]). Durch den reflektierten Anteil des Lichtschnitts nimmt die Ausleuchtung der Partikel in der Nähe der Beschichtung im Vergleich zu einer vollständig absorbierenden Oberfläche zu.

Die Parameter der PIV-Auswertung der drei Messpositionen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Um im Bereich der laminaren Ablöseblase eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen, wurde der Versatz der Auswertefenster unter die Hälfte der Fenstergröße reduziert.

## 4 METHODEN DER DATEN-VERARBEITUNG

### 4.1 Vorverarbeitung der Bilddaten

Trotz der verwendeten Oberflächenbeschichtung konnten mit der PIV-Auswertung in Oberflächennähe aus den Rohbilddaten keine Geschwindigkeitsinformationen generiert werden. Um auch in diesen Bereichen Messdaten erheben zu können, wurden die Rohbilddaten der Messungen vorverarbeitet. Dazu wird eine räumliche und zeitliche Hochpass-Filterung der Rohbilddaten durchgeführt. Anschließend wurde der Kontrast der Bilder verbessert, was maßgeblich die Detektion von Richtung und Betrag der Geschwindigkeit im Grenzschichtbereich verbesserte. Auf diese Weise konnten Geschwindigkeitsinformationen bis zu einem Abstand von 0.8 mm zur Oberfläche ermittelt werden. Bild 5 zeigt den Vergleich der Korrelationskoeffizienten eines Auswertefensters vor und nach der Vorverarbeitung der Bilddaten.

Es ist im Vergleich der Ergebnisse der Kreuzkorrelation (vgl. Bild 5(c) und 5(f)) erkennbar, dass eine PIV-Auswertung der Bilddaten erst durch die Vorverarbeitung möglich wurde. Aufgrund der prägnanten Linie der Lichtstreuung an der Oberfläche in den Rohbilddaten dominieren diese Farbwerte die Korrelationskoeffizienten und es ist nicht möglich, die Spitze in der Verteilung zu detektieren. Folglich kann an dieser Position keine Geschwindigkeit bestimmt werden.

<sup>2</sup>DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebakat ( $C_{26}H_{50}O_4$ )

Größe	Einheit	Messungen		
		Anströmung	Laminare Laufstrecke	Laminare Ablöseblase
Pulsabstand	[ $\mu$ s]	25	25	25
Auflösung	[Pixel/mm]	10.72	10.83	15.12
Gitterauflösung	[1/mm]	1.34	2.71	3.78
Interrogation-Area-Größe	[Pixel]	$16 \times 16$	$12 \times 12$	$24 \times 24$
Versatz der Interrogation Areas	[Pixel]	8	4	4
Maximaler Partikelversatz	[Pixel]	9.38	13.2	17.1
Fehlerquote	[%]	$\leq 1.0$	$\leq 0.1$	$\leq 2.3$

TAB 2: PIV-Auswerteparameter der drei Messungen

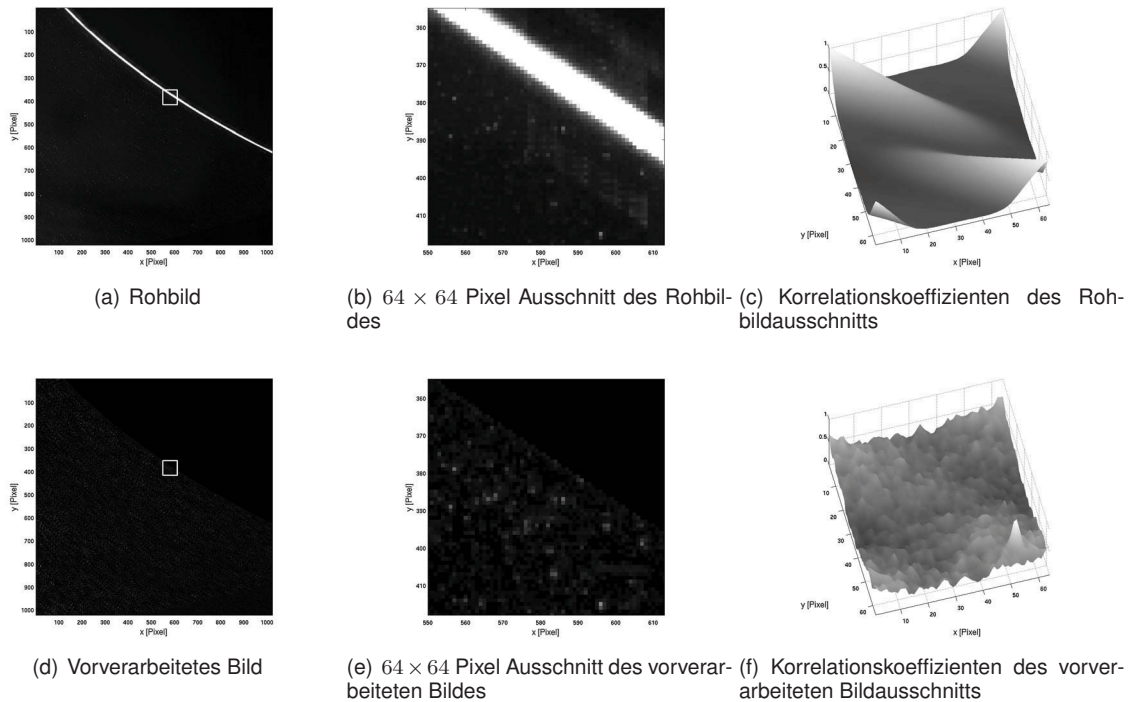


BILD 5: Vergleich der Kreuzkorrelationsergebnisse vor und nach der Vorverarbeitung

## 4.2 Wirbeldetektion

Um die Dynamik innerhalb der laminaren Ablöseblase charakterisieren zu können, ist es sinnvoll, aus den Geschwindigkeitsverteilungen wirbelartige Strukturen zu extrahieren. Zur Identifikation von solchen kohärenten Strukturen existieren Kriterien wie zum Beispiel das  $\lambda_2$ -Kriterium von Jeong und Hussain [16], die mathematische Rotation des Geschwindigkeitsfeldes oder das Swirling-Strength Kriterium von Adrian et al. [17]. Diese drei Kriterien zur Bestimmung des lokalen wirbelartigen Charakters basieren auf den Gradienten des Geschwindigkeitsfeldes. Bei turbulenten Strömungen anwendungsnaher Reynolds-Zahlen weisen die Geschwindigkeitsfelder von TR-PIV-Messungen häufig Schwankungen mit hohen räumlichen Wellenzahlen auf. Die resultierenden Gradientenfelder zeigen demnach auch ein hohes Maß an Fluktuationen, die sich in den Resultaten der gradienten-basierten Wirbelkriterien wiederfinden. Um größere kohärente Strukturen aus den skalaren Daten der Wirbelkriterien zu identifizieren, verwendeten

Schram et al. [18] und Varun et al. [19] zweidimensionale Wavelets.

Um die beiden Verarbeitungsschritte der Kriterienberechnung und Strukturfilterung zu kombinieren, wurde ein zweidimensionales vektrielles Wavelet entwickelt. Da die Ergebnisse von Wavelet-Analysen mitunter stark von dem verwendeten Wavelet abhängen, wurde die Form des Wavelets an die eines Potentialwirbels angepasst und stellt einen Einheitswirbel dar. Aufgrund dessen wird die Wavelet-Funktion als "Vortlet" bezeichnet. Gleichung 1 stellt die Vortlet-Funktion dar, wobei die Konstanten die Werte  $c_1 = \sqrt{2}e$  und  $c_2 = \sqrt{32}$  haben.

$$(1) \quad u_{\phi, \text{vort}}(r, \lambda_{\text{scale}}) = u_0 \frac{r c_1 c_2}{\lambda_{\text{scale}}} \exp \left\{ - \left[ \frac{r c_2}{\lambda_{\text{scale}}} \right]^2 \right\}$$

Bild 6 zeigt die Verteilung der Umfangsgeschwindigkeit des Vortlets  $u_{\phi, \text{vort}}$ . Der Parameter  $\lambda_{\text{scale}}$  dient zur Skalierung und ist identisch mit dem Durchmesser des Vortlets. Die Methode ist in [15] veröffentlicht und unter ande-



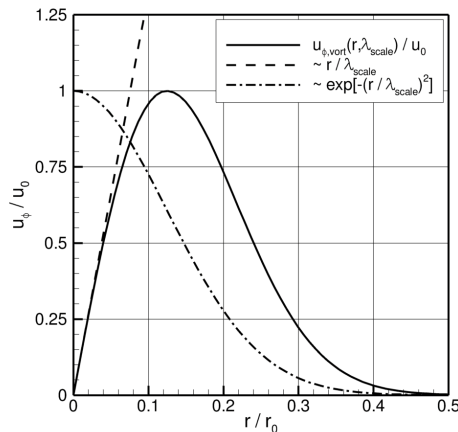


BILD 6: Vortlet-Funktion zusammen mit den beiden Termen über einem normierten Radius

rem auf zeitaufgelöste PIV-Daten von aktuierten turbulenten Strömungen angewendet.

## 5 ERGEBNISSE

Mit den Messungen der Anströmung der Statorkaskade konnten die Randbedingungen für den Vergleich mit dem Partner des numerischen Teilprojekts validiert werden. Die relative Abweichung von den angenommenen Werten über der Länge des Messfensters in Staffelführungsrichtung betrug sowohl bei der Anströmgeschwindigkeit als auch bei der Strömungsrichtung weniger als 0,5 %.

Mit der Messung der laminaren Laufstrecke konnte die Entwicklung der Schwankungsintensität innerhalb der Grenzschicht von der Vorderkante der Statorschaukel bis zur laminaren Ablöseblase aufgezeichnet werden. Bild 7 zeigt den RMS-Wert des Geschwindigkeitsbetrags, normiert mit dem Betrag der mittleren Geschwindigkeit im Bereich der laminaren Laufstrecke. Es zeigt sich, dass trotz Anwendung von Maßnahmen zur Reduktion von Streuungen in Oberflächennähe und Verbesserung der Bildqualität einzelne Regionen abseits von Bereichen mit hohen Schwankungsamplituden existieren, in denen leichte Anstiege der RMS-Werte zu verzeichnen sind. Im Bereich der Saugseitenoberfläche lässt sich erkennen, dass beginnend mit der Vorderkante das Niveau der Schwankungen in der Grenzschicht stetig leicht zunimmt. Am Punkt der laminaren Ablösung steigt die Schwankungsintensität stark an, was durch die instationären Strömungsvorgänge innerhalb der laminaren Ablöseblase verursacht wird.

Die Ergebnisse wurden in Schaufelsaugseiten-  $s$  und Wandabstandskoordinaten  $s_{\text{orth}}$  transformiert. Auf diese Weise ergeben sich die charakteristischen Geschwindigkeits- und RMS-Wertverteilungen einer laminaren Ablöseblase. Die gemittelte Geschwindigkeitsverteilung der laminaren Ablöseblase ist in Bild 8(a) dargestellt. Die entsprechende Verteilung der normierten RMS-Werte ist in Bild 8(b) dargestellt. Bis zu einem Abstand von 0,8 mm zur Schaufeloberfläche konnten Geschwindigkeitsinformationen aus den Bilddaten gewonnen werden. Aus der gemittelten Geschwindigkeits- und

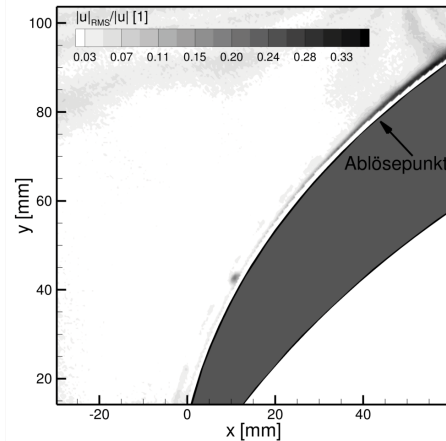


BILD 7: Normierte RMS-Wertverteilung der Geschwindigkeitsschwankungen im Bereich der laminaren Laufstrecke

RMS-Wertverteilung konnte eine Länge der laminaren Ablöseblase von  $l_{\text{LSB}} \approx 34 \text{ mm}$  bestimmt werden, was gut mit der Länge der Ablöseblase aus dem Ölanschichtbild (vgl. Bild 1) übereinstimmt. Die aus der gemittelten TR-PIV-Messung bestimmten Positionen von Ablösen und Wiederaanlegen der laminaren Ablöseblase sind in den Bildern 8(a) und 8(b) markiert. Diese konnte mit einem Verhältnis von Länge zu Impulsverlustdicke der Grenzschicht vor der Ablöseposition von  $\approx 170$  nach Gaster als kurze Ablöseblase kategorisiert werden.

Es lässt sich erkennen, dass vor der laminaren Ablöseblase eine dünne laminare Grenzschicht existiert. Über der laminaren Ablöseblase dickt die Grenzschicht durch die Verdrängungswirkung des Gebiets mit impulsarmem Fluid auf. Der Einfluss der Verdrängungswirkung auf die Außenströmung lässt sich anhand der mittleren Geschwindigkeitsverteilung der Außenströmung feststellen. Stromab der Ablöseblase entwickelt sich eine im Vergleich zur laminaren Grenzschicht stark aufgedickte turbulente Grenzschicht. Der Bereich, in dem sich instationär die Wirbel aufrollen und schließlich zerplatzen, ist gekennzeichnet durch hohe RMS-Werte (vgl. Bild 8(b)). Die instationären Schwankungen der laminaren Ablöseblase werden von der Strömung weiter stromab transportiert und sind Ursache für das hohe Schwankungsniveau innerhalb der turbulenten Grenzschicht.

In Bild 8(c) sind die normierten Schwankungsgeschwindigkeiten  $-u'v'/|u|^2$  dargestellt, die auf der in den Bildern der laminaren Ablöseblase eingezeichneten Schnittebene miteinander korreliert wurden. Die Korrelation der Schwankungsanteile beider Geschwindigkeitskomponenten entspricht den Reynolds-Scherspannungen und wird verwendet als Indikator von Instabilitäten im Bereich der Scherschicht der laminaren Ablöseblase. Der Bereich, in dem vermehrt höhere Amplituden von Scherspannungen auftreten, ist in Bild 8(c) mit dem Beginn des Transitionsbereichs gekennzeichnet.

Zur Identifikation von Wirbelstrukturen aus den Geschwindigkeitsdaten wurde eine instantane Geschwindigkeitsverteilung der Messung der laminaren Ablöseblase mit dem  $\lambda_2$ -Kriterium und der zuvor vorgestellten Vortlet-Methode ausgewertet. Die Bilder 9 und 10 zeigen jeweils die

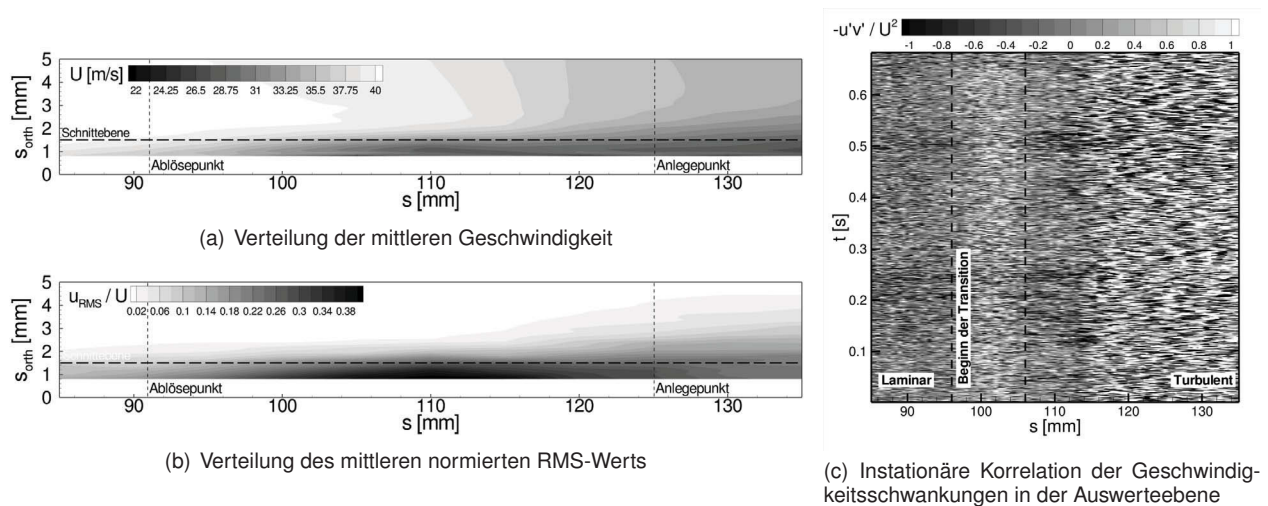


BILD 8: Auswertung der transformierten Geschwindigkeiten, Schwankungsintensitäten und Schwankungskorrelationen im Bereich der laminaren Ablöseblase

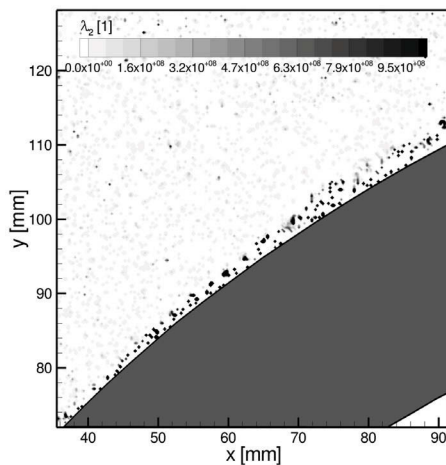


BILD 9: Instantane Verteilung des  $\lambda_2$ -Wirbelkriteriums

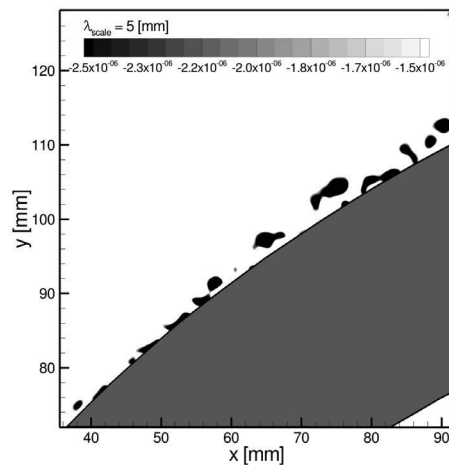


BILD 10: Instantane Verteilung der Korrelationskoeffizienten der Vortlet-Methode ( $\lambda_{\text{scale}} = 5 \text{ mm}$ )

Ergebnisse der beiden Wirbel detectionsverfahren. Es zeigt sich, dass das gradientenbasierte  $\lambda_2$ -Kriterium für diesen Anwendungsfall nicht gut geeignet ist, da die Geschwindigkeitsverteilung zu hohe Fluktuationen im Bereich der laminaren Ablöseblase aufweist. Jedoch werden in der laminaren Ablöseblase und der turbulenten Grenzschicht gehäuft kleinteilige Strukturen vom  $\lambda_2$ -Kriterium detektiert. Da die Vortlet-Methode eine implizite Filterung beinhaltet, lässt sich über den Skalierungsparameter  $\lambda_{\text{scale}}$  die Größe der detektierten Strukturen festlegen. Trotz der Fluktuationen der Geschwindigkeiten wurden größere zusammenhängende Strukturen innerhalb der laminaren Ablöseblase von der Vortlet-Methode detektiert. Die instantane Geschwindigkeitsverteilung zeigt den periodischen Abwurf von kohärenten Wirbelstrukturen aus der laminaren Ablöseblase in die turbulente Grenzschicht.

Zum Vergleich mit den TR-PIV-Messergebnissen wurden numerische RANS-Ergebnisse zweier unterschiedlicher kommerzieller Strömungslöser verwendet. Eine Simu-

lation wurde mit dem Strömungslöser ANSYS CFX von ANSYS Inc. und dem SST-Turbulenzmodell in Kombination mit dem Transitionsmodell von Menter und Langtry durchgeführt. Für die andere Simulation wurde FINE<sup>TM</sup>/Turbo von NUMECA verwendet. Dabei konnte nur das Spalart-Allmaras-Wirbelviskositätsmodell zusammen mit einer Fixierung der Transitionsposition verwendet werden. Der Vergleich der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen mit Ergebnissen der RANS-Simulationen zeigte eine gute Übereinstimmung. Jedoch wurde das Druckplateau der laminaren Ablöseblase von FINE<sup>TM</sup>/Turbo nicht wiedergegeben.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

An einer hochbelasteten Statorkaskade wurden Messungen mit zeitaufgelöster Particle Image Velocimetry durchgeführt. Es wurde die Anströmung an unterschiedlichen spannweiten Positionen vermessen. Auf diese

Weise konnten die Randbedingungen für den Partner des numerischen Teilprojekts validiert werden.

Des Weiteren wurden TR-PIV-Messungen in der Grenzschicht der Statorkaskadenseite durchgeführt. Um die Qualität der Ergebnisse der PIV-Auswertung zu verbessern, wurde eine reflektierende Oberflächenbeschichtung verwendet. Zusätzlich wurde in einer Vorverarbeitung der Rohbilddaten eine räumliche und zeitliche Hochpass-Filterung angewendet, mit der die Auswertung der Bilddaten bis zu einem Abstand von 0.8 mm zur Oberfläche erst ermöglicht wurde.

Die Entwicklung der Instationarität innerhalb der Grenzschicht von der Vorderkante bis zur laminaren Ablöseblase konnte mit den gewonnenen Messdaten gezeigt werden. Die zeitlich gemittelten Daten zeigten die charakteristische Form einer laminaren Ablöseblase. Aus der so ermittelten Länge der Ablöseblase wurde nach Gaster die Kategorie der Ablöseblase bestimmt. Mit Hilfe von Schwankungsgeschwindigkeiten konnte der Bereich der Transition der laminaren Ablöseblase identifiziert werden.

Mit einem neu entwickelten wavelet-basierten Wirbelkriterium konnten aus instantanen Geschwindigkeitsverteilungen kohärente Wirbelstrukturen extrahiert werden. Die Anwendung des Wirbelkriteriums auf andere Strömungsfälle ist geplant.

Der Vergleich zu numerischen Ergebnissen der laminaren Ablöseblase auf der Saugseite der Statorkaskade zeigte qualitativ gute Übereinstimmung.

## Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen einer Studienarbeit am Fachgebiet für Aerodynamik des Institut für Luft- und Raumfahrt an der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Für die Betreuung und Unterstützung bei der Arbeit wird Herrn Dipl.-Ing. Martin Hecklau und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nitsche herzlich gedankt.

## 7 LITERATUR

- [1] Zander V., Hecklau M., Nitsche W., Huppertz A. und Swoboda M.: *Experimentelle Methoden zur Charakterisierung der aktiven Strömungskontrolle an einer hoch belasteten Verdichterkaskade*, Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress 2008, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Darmstadt, 2008
- [2] Zander V., Hecklau M., Nitsche W., Huppertz A. und Swoboda M.: *Active control of corner vortices on a highly loaded compressor cascade*, 8th European Turbomachinery Conference (ETC), Graz, 2009
- [3] Hecklau M., Zander V., Peltzer I., Nitsche W., Huppertz A. und Swoboda M.: *Experimental AFC Approaches on a Highly Loaded Compressor Cascade*, King R., Active Flow Control II, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 108, pp. 171-186, Springer, Berlin, 2010
- [4] Wiederhold O., King R. und Noack B.R.: *Robust Control in Turbomachinery Configurations*, King R., Active Flow Control II, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 108, pp. 187-201, Springer, Berlin, 2010
- [5] Gmelin C., Steger M., Wassen E., Thiele F., Huppertz A. und Swoboda M.: *URANS Simulations of Active Flow Control on Highly Loaded Turbomachinery Blades*, King R., Active Flow Control II, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Volume 108, pp. 203-219, Springer, Berlin, 2010
- [6] Horton H.P.: *A semi-empirical theory for growth and bursting of laminar separation bubbles*, Aeronautical Research Council, Ministry of Technology, London, 1969
- [7] Gaster M.: *Laminar separation bubbles*, Govindarajan R., Sixth IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition, pp. 1-13, Springer, Berlin, 2006
- [8] Rist U.: *Zur Instabilität und Transition in laminaren Ablöseblasen*, Shaker, Aachen, 1999
- [9] Lang M., Rist U. und Wagner S.: *Investigation on controlled transition development in a laminar separation bubble by means of LDA and PIV*, Experiments in Fluids, Volume 36, pp. 43-52, Springer, Berlin, 2004
- [10] Häggmark C.P., Hildings C. und Henningson D.S.: *A numerical and experimental study of a separation bubble*, Aerospace Science Technology, Volume 5, pp. 317-328, 2005
- [11] Roberts S.K. und Yaras M.I.: *Large-eddy simulation of transition in a separation bubble*, Journal of Fluids Engineering, Volume 128, pp. 232-238, 2006
- [12] Burgmann S., Dannemann J. und Schröder W.: *Time-resolved and volumetric PIV measurements of a transitional separation bubble on an SD7003 airfoil*, Experiments in Fluids, Volume 44, pp. 609-622, Springer, Berlin, 2007
- [13] Burgmann S. und Schröder W.: *Investigation of the vortex induced unsteadiness of a separation bubble via time-resolved scanning PIV measurements*, Experiments in Fluids, Volume 45, pp. 675-691, Springer, Berlin, 2008
- [14] Zhang W., Hain R. und Kähler C.J.: *Scanning PIV investigation of the laminar separation bubble on a SD7003 airfoil*, Experiments in Fluids, Volume 45, pp. 725-743, Springer, Berlin, 2008
- [15] Hecklau M., van Rennings R., Zander V., Nitsche W., Huppertz A. und Swoboda M.: *Particle image velocimetry of active flow control on a compressor cascade*, im Druck befindlich: Experiments in Fluids, Springer, Berlin, 2010
- [16] Jeong J. und Hussain F.: *On the identification of a vortex*, Journal of Fluid Mechanics, Volume 285, pp. 69-94, Cambridge University Press, 1995
- [17] Adrian R.J., Christensen K.T. und Liu Z.-C.: *Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields*, Experiments in Fluids, Volume 29, pp. 275-290, Springer, Berlin, 2000
- [18] Schram C., Rambaud P. und Riethmüller M.L.: *Wavelet based eddy structure eduction from a backward facing step flow investigated using particle image velocimetry*, Experiments in Fluids, Volume 36, pp. 233-245, Springer, Berlin, 2004
- [19] Varun A., Balasubramanian K. und Sujith R.I.: *An automated vortex detection scheme using the wavelet transform of  $d_2$  field*, Experiments in Fluids, Volume 45, pp. 857-868, Springer, Berlin, 2008