

EXPERIMENTELLE METHODEN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER AKTIVEN STRÖMUNGSKONTROLLE IN EINER HOCH BELASTETEN VERDICHTERKASKADE

V. Zander, M. Hecklau, W. Nitsche, TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt,
Marchstraße 12, 10587 Berlin, Deutschland

A. Huppertz, M. Swoboda, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co. KG,
Eschenweg 11, 15827 Dahlewitz, Deutschland

Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird der neue Kaskadenprüfstand für die Erprobung aktiver Methoden zur Strömungsbeeinflussung am ILR vorgestellt. Es werden erste Ergebnisse der Vermessung der Grundströmung mit der Ölanstrichmethode und instationärer flächiger Druckmessungen gezeigt. Die Kombination beider Messtechniken gibt ein detailliertes Bild der Strömungsvorgänge an den Schaufeln. Die Auswertung zeigt, dass mit dem RMS-Wert der Druckschwankungen ein geeignetes Kriterium zur Charakterisierung der Sekundärströmungseffekte auf der Schaufeloberfläche gefunden wurde.

1. EINLEITUNG

Die Leistungsanforderungen an moderne Flugzeuggasturbinen bezüglich Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit steigen auch in Zukunft weiter an. Leichtere und kompaktere Triebwerke sind bei gleicher Leistung aufgrund der Gewichtserspartnis wirtschaftlicher. Der Verdichter nimmt in modernen Triebwerken etwa 50-60% der Baulänge ein und ist mit 40-50% am Gesamtgewicht beteiligt, [1]. Hier besteht ein signifikantes Gewichtseinsparungspotenzial. Größe und Gewicht des Verdichters ergeben sich aus den hohen Verdichterdruckverhältnissen in Verbindung mit den relativ geringen Stufendruckverhältnissen und der daraus resultierenden großen Anzahl an Verdichterstufen. Um das Einsparpotenzial voll ausschöpfen zu können, ist eine Reduzierung der Stufenanzahl und eine damit verbundene Anhebung des Stufendruckverhältnisses notwendig. Eine weitere Erhöhung des Druckverhältnisses in modernen Axialverdichtern kann z.B. durch eine aktive Beeinflussung der Schaufelumströmung erfolgen [2], [3]. Es gilt, die auftretende Strömungsablösung infolge der verstärkten Umlenkung zu unterbinden, um hohe Wirkungsgrade und einen stabilen Verdichterbetrieb zu erreichen. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Realisierung einer überkritischen Strömungsumlenkung an einer Verdichterkaskade unter Verwendung aktiver Methoden zur Ablösekontrolle. Für diese Versuche wurde ein neuer Kaskadenprüfstand aufgebaut und erprobt. Zur Beurteilung der Grundströmung wurden Ölanstrichversuche, Druck- und zeitaufgelöste PIV-Messungen an der Kaskade vorgenommen. Aufgrund der hohen aerodynamischen Belastungen stellt sich ein komplexer dreidimensionaler Strömungszustand an der Kaskade

ein. Die räumliche Erfassung der komplexen Strömungsstrukturen an den Schaufeln der Kaskade ist mit der Methode der Particle Image Velocimetry (PIV) möglich, jedoch sehr aufwändig, [4]. Das räumliche Geschwindigkeitsfeld kann alternativ aus mehreren Messungen in benachbarten Ebenen gewonnen werden, [5]. Das Ergebnis ist eine vollständige zeitaufgelöste Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes in den betrachteten Messebenen. Die wandgebundenen Ölanstrich- oder Druckmessverfahren lassen sich schneller durchführen, liefern aber nur Informationen über die wandnahen Strömungsvorgänge. Sie sind diesbezüglich für die Voruntersuchungen und eine breite Variation der Anströmbedingungen besser geeignet. Mit dem Ölanstrichverfahren können anschauliche, jedoch ausschließlich qualitative und zeitlich invariante Ergebnisse erzeugt werden. Die Druckmessungen ermöglichen auch die Aufnahme des zeitlichen Verlaufs der Druckschwankungen. Eine Kombination beider Messverfahren bietet sich daher an, um die Vorteile beider Methoden miteinander zu kombinieren. Es entsteht ein detailliertes Bild der Strömungsvorgänge an der Schaufel und ermöglicht so den gezielten Einsatz aktiver Methoden zur Beeinflussung der Schaufelumströmung.

2. VERSUCHSAUFBAU

2.1. Kaskadenprüfstand

Am Institut für Luft- und Raumfahrt der Technischen Universität Berlin wurde ein Niedergeschwindigkeits-

kaskadenprüfstand für Untersuchungen zur aktiven Strömungskontrolle aufgebaut. Die Geometrie der Schaufeln wurde auf eine Sehnenlänge von $L = 375\text{mm}$ skaliert (Bild 1). Bei einem Seitenverhältnis von $h/L = 0,8$ ergibt sich eine Schaufelhöhe von $h = 300\text{mm}$. Nach der Vergrößerung weisen die Schaufeln eine ausreichend dimensionierte Profildicke zur Integration von Aktuatorik für eine aktive Strömungsbeeinflussung auf. Der Staffelungswinkel der Kaskade beträgt $\gamma = 20^\circ$ bei einem Staffelungsabstand von $\tau = 150\text{ mm}$. Der Eintrittswinkel kann zwischen $\beta_1 = 50^\circ$ und $\beta_1 = 70^\circ$ stufenlos verstellt werden. Im Auslegungsfall wird ein Eintrittswinkel von $\beta_1 = 60^\circ$ an der Kaskade eingestellt. Das Verzögerungsverhältnis der verwendeten Schaufelgeometrie nach DE HALLER ist mit $DH = 0,5$ sehr niedrig. In Verbindung mit der starken Strömungsumlenkung von 60° lässt dies das Auftreten ausgeprägter Sekundärströmungseffekte in Kombination mit einem Strömungsabriss vermuten (Bild 1). Die Kaskade besteht aus insgesamt sieben Schaufeln. An den Enden der Schaufelreihe sind Tailboards angebracht. Der Zuströmquerschnitt im Auslegungsfall beträgt $525\text{mm} \times 300\text{mm}$. Er lässt sich in der Höhe variieren, um Messungen bei unterschiedlichen Eintrittswinkeln durchführen zu können. Aufgrund der starken Strömungsumlenkung in der Kaskade wird ein offener Windkanal nach Eiffel-Bauart verwendet. Im Auslegungsfall beträgt die Zuströmgeschwindigkeit $v_1 = 34\text{ ms}^{-1}$ bei einer konstanten

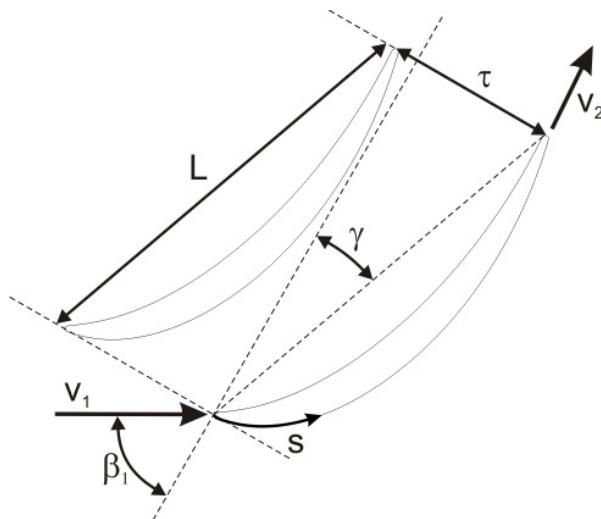


Bild 1. Schaufelgeometrie

Temperatur von 21°C . Dies entspricht einer auf die Profilsehnenlänge bezogenen Reynolds-Zahl von $Re_c = 840\,000$. Die Zuströmbedingungen in die Kaskade werden durch die statischen Druckbohrungen vor der Schaufelreihe überwacht. Homogene Anströmverhältnisse lassen sich durch Einstellen der oberen und unteren Kanalwand sowie der Grenzschichtabsaugung realisieren. Ein Querschnitt durch die Messstrecke ist in Bild 2 zu sehen. Messungen an der Kaskade werden immer an der mittleren Schaufel oder in deren Nachlauf durchgeführt.

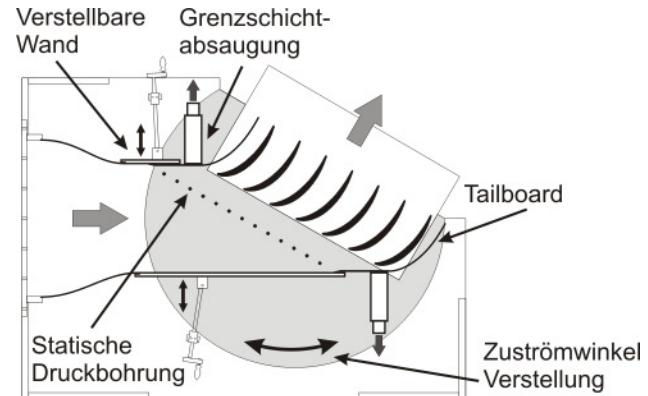


Bild 2. Schnittansicht der Messstrecke

2.2. Ölstrichversuche

Bei den zu erwartenden komplexen Strömungsstrukturen an der Beschaufelung der Kaskade wurde zunächst eine Visualisierung der Wandstromlinien mit Hilfe des Ölstrichverfahrens vorgenommen. Neben der qualitativen Analyse der Strömungstopologie gibt das Ölstrichverfahren Aufschluss über die sinnvoll einzusetzende Messtechnik und deren Positionierung in der Messstrecke [6]. Zusätzlich bietet das Ölstrichverfahren aufgrund seiner einfachen Anwendbarkeit die Möglichkeit, mehrere Schaufeln der Kaskade gleichzeitig zu untersuchen. Somit kann nachgewiesen werden, dass an den mittleren Schaufeln gleichmäßige Strömungsbedingungen vorliegen. Für den Ölstrich wurde ein Gemisch aus Titanoxid, Öl, Terpentin und Farbpigmenten verwendet. Die Schaufeln wurden gleichmäßig mit dem Gemisch bestrichen und im noch feuchten Zustand in die Kaskade eingebaut. Nach der Trocknung in der Strömung wurden die Anstrichbilder mit einer hochauflösenden Digitalkamera aufgenommen. In der Nachbearbeitung der Aufnahmen konnten die Bilder entzerrt und über die Lauflänge der jeweiligen Schaufelseite aufgetragen werden.

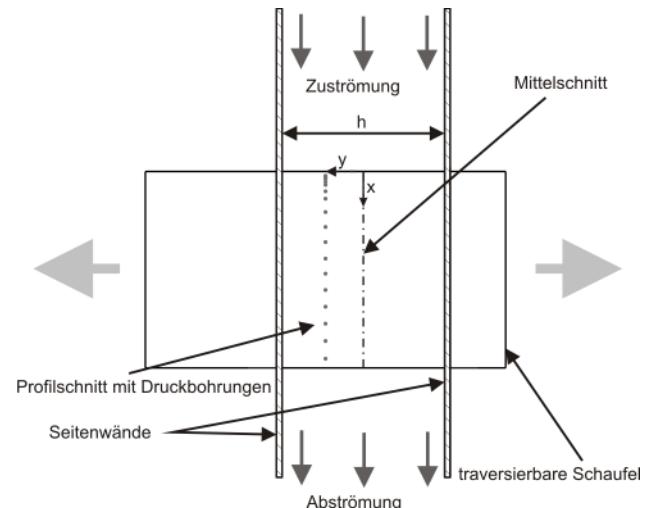


Bild 3. Traversierbare Druckmessschaufel (Draufsicht)

2.3. Profildruckmessung

Neben den Ölanstrichversuchen stellt die Profildruckverteilung ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Schaufelumströmung dar. Die Voruntersuchungen zur Visualisierung der Strömungsstruktur haben gezeigt, dass die auftretenden Strömungsstrukturen nur hinreichend bei einer flächigen Vermessung der Druckverteilung aufgelöst werden können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde eine durch die Messtrecke traversierbare Schaufel mit schnellen und hochauflösenden Drucksensoren ausgerüstet (Bild 3, Bild 4) und in der Mitte der Kaskade eingesetzt. Die Anordnung der Druckaufnehmer direkt unter der Schaufeloberfläche ermöglicht die zeitliche Auflösung der Druckschwankungen an der Schaufeloberfläche. Für die Profildruckmessungen wurden insgesamt 44 Druckbohrungen mit jeweils einem Miniaturdrucksensor ausgerüstet. Davon befanden sich 27 auf der Saugseite und 17 auf der Druckseite. Die Positionierung der Bohrungen erfolgte anhand von numerischen 2D Voruntersuchungen mit dem Profilanalyseprogramm MISES. Die Signale der Druckaufnehmer wurden zunächst verstärkt und anschließend mit einem Multikanal AD-Wandler aufgezeichnet. Die Messzeit betrug $t = 32\text{ s}$ bei einer Abtastrate von $f = 8192\text{ Hz}$. Das stufenlose Verschieben des Messeinsatzes ermöglicht das Erfassen der Druckverteilung im Bereich von 10mm bis 290mm über der Schaufelhöhe. Für die Messung wurde der gesamte Bereich mit einer Schrittweite von $\Delta y = 5\text{ mm}$ abgefahren. Für die Berechnung des Druckbeiwertes wurde die aus der Profilaerodynamik bekannte Definition:

$$(1) \quad c_p = \frac{p_x - p_s}{P_T - p_s}$$

verwendet. Mit dem statischen Druck p_x der Profildruckbohrung sowie dem statischen Druck p_s und dem Gesamtdruck P_T der Anströmung. Der statische Druck der Anströmung wird an einer Wanddruckbohrung im Einlaufbereich der Kaskade abgenommen. Für die Messung des Gesamtdruckes wird im Bereich des Einlaufs ein Pitot-Rohr eingesetzt.

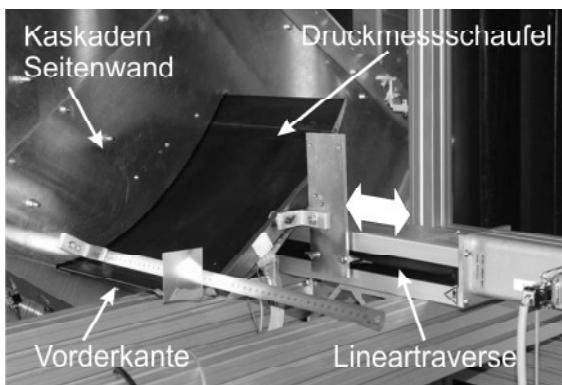


Bild 4. Versuchsaufbau für die Druckmessungen

3. MESSERGEBNISSE

3.1. Strömungsvisualisierung

Die Strömungsvisualisierung mit dem Ölanstrichverfahren wurde an den drei mittleren Schaufeln auf der Druck- und Saugseite durchgeführt. Die vorgestellten Ergebnisse beschränken sich auf die Betrachtung der Saugseite der mittleren Schaufel. Bild 5 zeigt das Anstrichbild der Saugseite für eine Anströmung bei $u = 34\text{ ms}^{-1}$, aufgetragen über die relative Lauflänge s/s_{\max} der Schaufel (Bild 1). Die Schaufelvorderkante befindet sich bei 0% der relativen Lauflänge, die Hinterkante bei 100% der Saugseitenlänge. Die Mittelschnittebene liegt bei 0% der relativen Schaufelhöhe. Beginnend an der Vorderkante lässt sich ein Gebiet laminarer Strömung erkennen. Die Ausdehnung stromab ist abhängig von der Reynolds-Zahl. Eine Reduzierung der Reynolds-Zahl Re_c bewirkt eine Ausdehnung des Gebietes zur Schaufelhinterkante. Die anschließende Transition erfolgt über eine laminare Ablöseblase mit turbulentem Wiederanlegen. Die Lage und Ausdehnung der Blase ist in der Aufnahme durch die Ansammlung der Farbpigmente in dem Rückströmgebiet zu erkennen. Ebenso wie die Lage ist auch die Länge der Blase von der Reynolds-Zahl Re_c abhängig. Mit steigender Geschwindigkeit verkürzt sich die axiale Länge der Blase. Die Änderung wird durch den Turbulenzanstieg der Anströmung bei einer Geschwindigkeitserhöhung verursacht. Auf Höhe der Ablöseblase beginnen die Eckenwirbel stärker anzuwachsen. Der

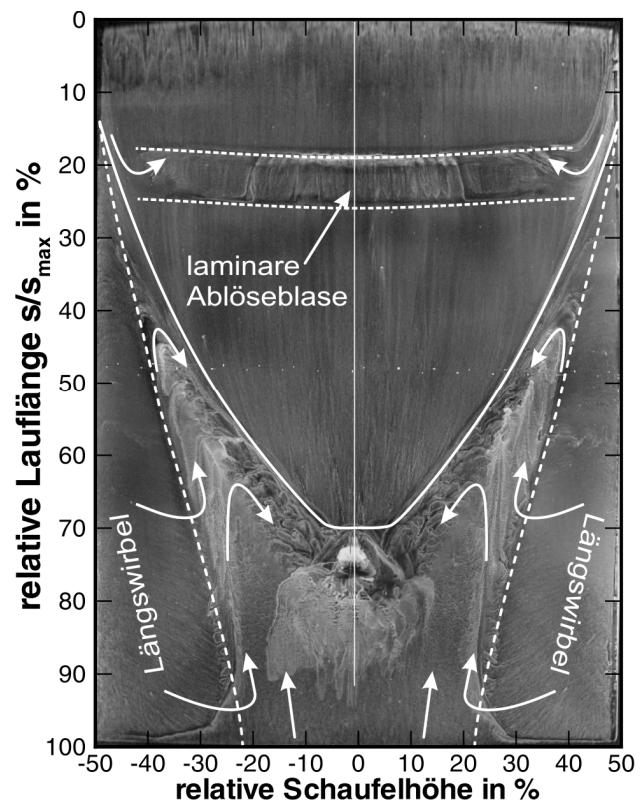


Bild 5. Ölströmung der Saugseite für $Re_c = 840\,000$

Bereich anliegender Strömung hinter der Ablöseblase wird durch die starke Entwicklung der Eckenwirbel stromab weiter eingeschnürt. Bei 72% Lauflänge kommt es zu einer vollständigen Strömungsablösung auf der Saugseite. Die Längswirbel wachsen stromab weiter an, bis sie an der Hinterkante 60% der Schaufelhöhe abdecken. Die gleichförmige Entwicklung der Längswirbel und die damit verbundene Einschnürung des Strömungsquerschnittes sind Indizien für die gleichmäßigen Zuströmbedingungen der Kaskade. Das geringe Verzögerungsverhältnis von $DH = 0,5$ und die damit verbundenen hohen Schaufelbelastung ließen erhebliche Strömungsverluste in Form von Strömungsablösung und Sekundärströmungen erwarten. Die Resultate aus den Ölstrichversuchen stehen in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Braunschweiger Kaskadenprüfstandes, [7].

3.2. Profildruckverteilung

Die Druckverteilung ist ein wesentliches aerodynamisches Kriterium zur Bewertung der Schaufelumströmung. In Bild 6 sind die Mittelwerte der Druckverteilungen für unterschiedliche Schaufelhöhenpositionen aufgetragen. Abweichend zu dem in Bild 5 gezeigten Ölstrich wurde hier als Längskoordinate die relative Schaufelsehnelllänge x/L verwendet. Für die Position der einzelnen Schnitte in Richtung der Schaufelhöhe wurde dieselbe Normierung verwendet wie beim Ölstrich. Alle Graphen zeigen bei $x/L = 8\%$ einen deutlich ausgeprägten Saugspitze auf der Saugseite mit anschließendem starkem Druckanstieg. Die Kurven für den mittleren Schaufelbereich bis 30% der relativen Schaufelhöhe zeigen stromab des Peaks bei etwa 20% Profiltiefe die laminare Ablöseblase, die schon in dem Anstrichbild Bild 5 zu erkennen war. Nach dem turbulenten Wiederanlegen der Strömung steigt der Druck auf der Saugseite weiter stark an. Erst bei etwa $x/L = 40\%$ kommt es zu einer Reduktion des Druckanstieges auf der

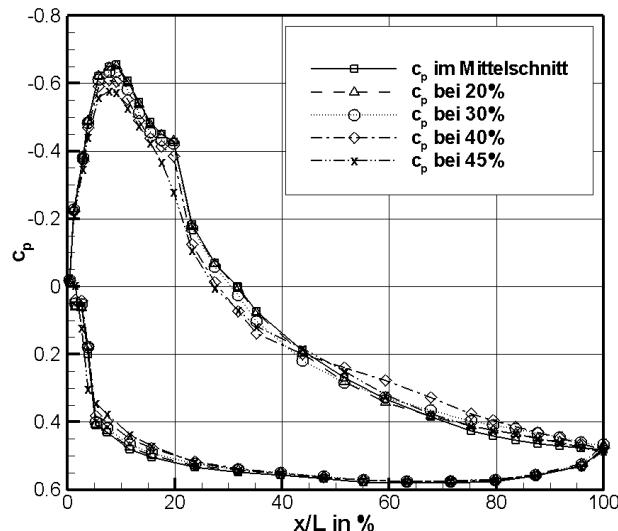


Bild 6. Druckverteilung an ausgewählten Profilschnitten

Saugseite. Nach dem turbulenten Wiederanlegen der Strömung zeigen sich Unterschiede in der Druckverteilung im mittleren Bereich der Schaufel. Der Verlauf der 40% Linie zeigt einen im Vergleich zu Schaufelmitte stärkeren Druckanstieg. Bei $x/L = 45\%$ schneidet die Kurve den Graphen für die Schaufelmitte und verläuft im Anschluss flacher. An der Hinterkante erreichen alle Kurven wieder dasselbe Druckniveau. Die Kurve für 45% relative Schaufelhöhe weist im vorderen Schaufelbereich Unterschiede im Vergleich zur Schaufelmitte auf. Das Druckniveau ist in diesem Bereich insgesamt geringer. Das Druckplateau der Ablöseblase tritt nicht mehr auf. Im wandnahen Bereich verschwindet die laminare Ablöseblase. Dies war schon in dem Ölstrichbild zu beobachten. Bei $x/L = 45\%$ liegen die Werte wieder auf denen des Mittelschnittes. Auf der Druckseite sind die Unterschiede in den Graphen hingegen nur gering. Im Bereich der Vorderkante tritt hier ebenfalls eine Ablöseblase auf. Nur in der Nähe der Wand bei 45% relativer Schaufelhöhe verläuft der Druckanstieg bis etwa $x/L = 30\%$ langsamer als in der Schaufelmitte. Die Druckverteilung auf der Druckseite ist darüber hinaus sehr homogen. Die weiteren Betrachtungen beschränken sich aus diesem Grund ausschließlich auf die Messergebnisse der Saugseite. Die Unterschiede in den Kurvenverläufen für die Druckverteilung auf der Saugseite lassen sich noch deutlicher in der flächigen Darstellung des Druckbeiwertes erkennen. Bild 7 zeigt die Druckverteilung auf der Saugseite, aufgetragen über der relativen Lauflänge und der Schaufelhöhe der Saugseite. Die Änderung des Auftragungsmaßstabes in axialer Richtung verhindert besonders im Bereich großer Schaufelkrümmungen einen direkten

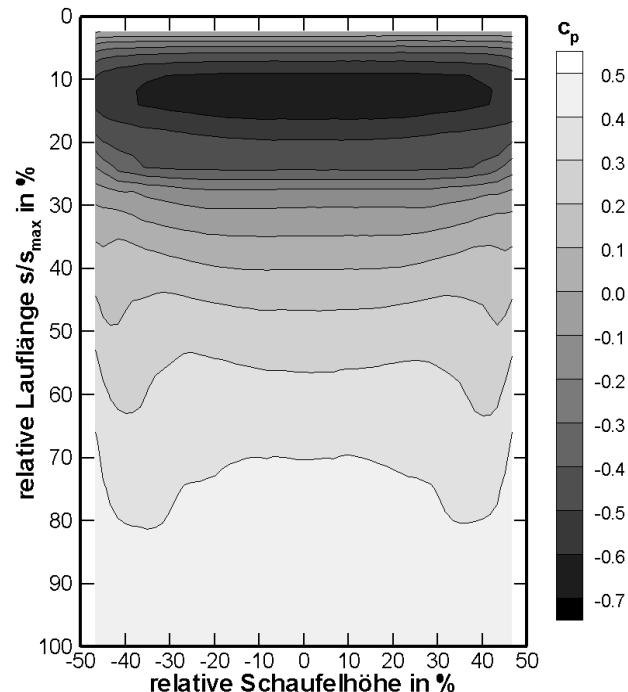


Bild 7. Mittlere Druckverteilung für $Re_c = 840\,000$ auf der Saugseite

Vergleich der Abbildungen Bild 6 und Bild 7. In der flächigen Darstellung der Druckverteilung sind die Bereiche geringen Druckes schwarz eingefärbt, die mit hohem Druck sind in weiß dargestellt. Die flächige Darstellung der Druckverteilung zeigt sehr anschaulich die Symmetrie der Schaufelumströmung zur Mittelachse. Die grundlegende Charakteristik der Umströmung ist in dieser Darstellungsform ersichtlich. Die Saugspitze liegt bei etwa 12% der Saugseitenlauflänge und erreicht ihre minimalen Werte zwischen -40% bis 40% der relativen Schaufelhöhe. Wie schon in der Schnittansicht zu erkennen war, steigt der Druck in Richtung der Seitenwände an. Das Druckplateau der Ablöseblase ist in Bild 7 gut durch den großen Isobarenabstand hinter der Saugspitze zu erkennen. Die axiale Position ist identisch mit der aus dem Ölanstrichversuch. Die Ablöseblase erstreckt sich quer zur Strömungsrichtung über dieselbe Breite wie die Saugspitze. Der enge Abstand der Isolinien hinter der Blase zeigt den starken Druckanstieg im Anschluss an die Ablöseblase. Ab etwa 35% der Saugseitenlauflänge lassen sich auf beiden Seiten der Druckverteilung Ausbuchtungen in den Isobaren erkennen, die stromab weiter anwachsen. Dieses Phänomen tritt in der Profilschnitt-Darstellung nicht so deutlich hervor. Die flächige Aufbereitung der Druckdaten in Bild 7 ist somit besser geeignet, um die Dreidimensionalität der Strömung zu erfassen. Besonders deutlich wird der Vorteil, wenn die Isolinien der Druckverteilung gemeinsam mit den Ergebnissen aus den Ölanstrichversuchen dargestellt werden. Bild 8 zeigt die Kombination

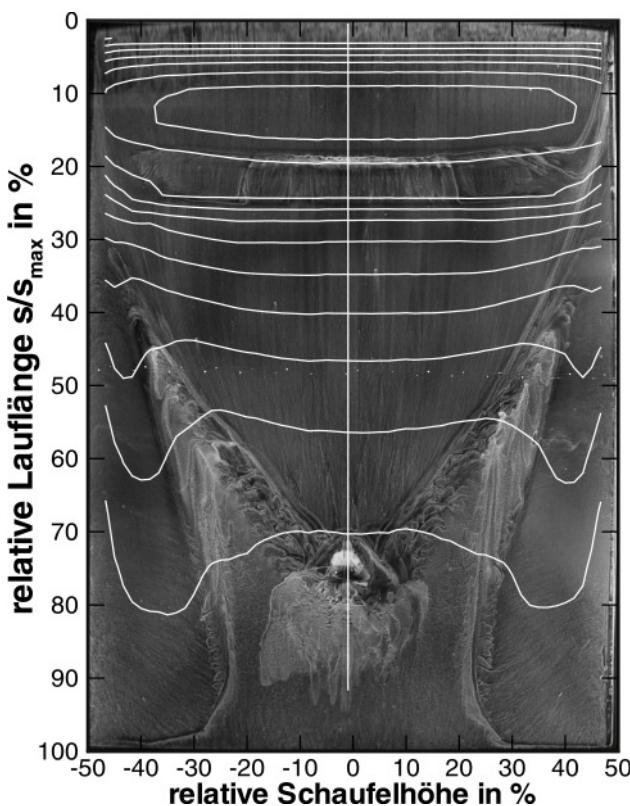


Bild 8. Isobaren und Ölanstrichbild

beider Ergebnisse. Die Ausbuchtungen in den Isobaren können nun sehr anschaulich mit dem Auftreten der Eckenwirbel in Verbindung gebracht werden. Beginnend von der Wand bis zur Mitte der Längswirbel fällt der Druck stark ab. Anschließend steigt der Druck in Richtung Schaufelmitte wieder an. Im Bereich anliegender Strömung erreicht der Druck ein annähernd konstantes Niveau. Dieses Ergebnis scheint plausibel, da der Druck in beiden Wirbelkernen auf Grund der höheren Rotationsgeschwindigkeiten abfällt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Absenkung des statischen Druckes im Wirbelkern durch die Druckmessung gut erfasst werden kann.

3.3. RMS-Wert des Druckes

Das hohe zeitliche Auflösungsvermögen der Drucksensoren bis zu einer Grenzfrequenz von 500Hz und deren oberflächennaher Einbau in die Schaufel ermöglichen die Aufnahme instationärer Druckdaten. Dies gewährt einen tieferen Einblick in die Strömungsvorgänge an der Schaufel und deren erweiterte Analyse. Die große Menge an aufgenommenen Messdaten stellt jedoch erhebliche Anforderungen an die Auswertung. Eine einfach zu berechnende Größe ist der RMS-Wert der einzelnen Druckmessungen. Er stellt ein Maß für die Schwankungsintensität dar, und eignet sich daher zur Charakterisierung des instationären Druckfeldes. Wird für die Berechnung des RMS-Werts nur der Schwankungsanteil des Drucksignals verwendet ist das Ergebnis identisch mit der Standartabweichung des Signals. Die Berechnung erfolgte nach der bekannten Definition:

$$(2) \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (c_{p,i})^2}{m}}$$

mit der Abweichung vom Mittelwert $c_{p,i}$ des Drucksignals und der Anzahl m an aufgenommenen Messpunkten. Für die Auswertung wurden die Drucksignale zunächst mit einer Grenzfrequenz von 500Hz tiefpass gefiltert. Anschließend erfolgte die Berechnung des RMS-Werts nach Gleichung (2). In Bild 9 ist das Berechnungsergebnis für die Saugseite der Schaufel dargestellt. Der RMS-Wert wurde zur besseren Darstellung auf sein Maximum normiert. Die Auftragung erfolgt wie bei den Druckmessungen über der relativen Lauflänge der Saugseite und der normierten Schaufelhöhe. Die Maximalwerte sind in weiß dargestellt, die Minima in Schwarz. Die Betrachtung lässt sofort die bereits zuvor gezeigten Strömungsstrukturen erkennen. Die Symmetrie zur Schaufelmitte ist in dieser Darstellungsform ebenfalls deutlich zu erkennen. Im vorderen Schaufelbereich bis etwa 22% der Lauflänge ist das Niveau der RMS-Werte gleichmäßig niedrig. Im Anschluss daran befinden sich die Maximalwerte in der RMS-Verteilung. Form und

Lage des Gebietes maximaler RMS-Werte lässt auf einen Zusammenhang mit der Ablöseblase auf der Saugseite schließen. Im Bereich der Eckenwirbel sind ebenfalls Gebiete hohen Schwankungsanteils zu finden. Auf beiden Seiten bilden sich zwei keulenförmige Regionen mit erhöhten RMS-Werten aus. Stromab reduzieren sich die Beträge der

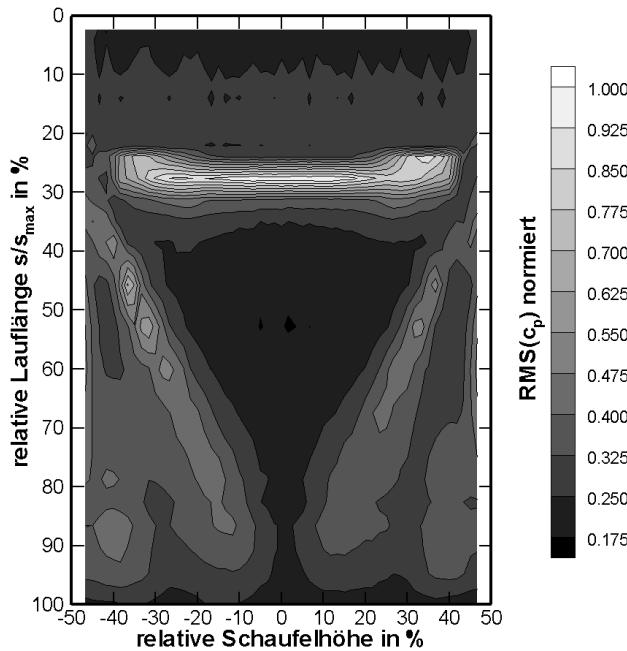


Bild 9. RMS-Verteilung der Druckmessung auf der Saugseite

Schwankungsintensität in diesen beiden Regionen. Die RMS-Verteilung der Druckschwankungen wurde anschließend mit dem Ölanstichbild (Bild 5) zusammengefügt. Das Ergebnis ist in Bild 10 dargestellt. Die Kombination der beiden unterschiedlichen Messverfahren ermöglicht eine anschauliche Interpretation der Druckmessungen. Die Übereinstimmung der beiden Messungen ist klar ersichtlich. Bemerkenswert ist, dass die Ergebnisse der instationären Auswertung der Druckdaten gut mit den zeitlich gemittelten Resultaten aus den Ölanstrichversuchen übereinstimmen. Die Maximalwerte in der RMS-Verteilung bei 26% der Saugseitenlauflänge befinden sich genau in dem Gebiet des turbulenten Wideranlegens der Strömung an die Schaufel. Dieser Vorgang verursacht starke Schwankungen in den Druckmesswerten. Die leichte Verschiebung der Ablöseblase im mittleren Schaufelbereich führt zu der etwas ungleichmäßigen Verteilung der RMS-Werte in dieser Region. Die Drucksensoren wurden auf einer geraden Linie von einer Seitenwand zur anderen verschoben. An den äußeren Rändern der Blase befand sich die entsprechende Druckbohrung unmittelbar im Wideranlegepunkt, und hat in dieser Position große Druckschwankungen aufgenommen. Durch die leichte Verschiebung der Blase stromab in der Schaufelmitte befand sich die Druckbohrung dort im Rezirkulationsgebiet der Ablöseblase. Hier sind die Druckschwankungen geringer. Die starken

Druckschwankungen werden in diesem Bereich von der stromab benachbarten Druckbohrung erfasst. Die flächige Darstellung in Form von Isolinien hebt diesen Effekt zusätzlich hervor. Neben dem turbulenten Wiederanlegen zeigt Bild 10 einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Eckenwirbel und den hohen RMS-Werten im hinteren Schaufelbereich. In Kombination mit Bild 9 ist zu erkennen, dass in der Schaufelmitte im Gebiet anliegender Strömung die Schwankungsintensität relativ gering ist. In den Bereichen abgelöster Strömung zwischen den Eckenwirbeln und der anliegenden Strömung in der Schaufelmitte treten lokale Maxima in der Schwankungsintensität auf. Im Abschnitt zwischen 40% und 60% der Lauflänge sind mehrere Peaks nebeneinander zu finden. Mit zunehmender Lauflänge nimmt der Betrag der RMS-Werte ab. In den wandnahen Bereichen zwischen 70% und 95% der Schaufellaufänge bilden sich ebenfalls Gebiete erhöhter Druckschwankungen aus. Der Ölanstrich zeigt, dass die Eckenwirbel in diesem Bereich schon stark angewachsen sind. Die Druckschwankungen werden durch Instabilitäten der Eckenwirbel verursacht. Die Berechnung der Schwankungsintensität nach Gleichung (2) gibt die relevanten Strömungsstrukturen an der Schaufel gut wieder.

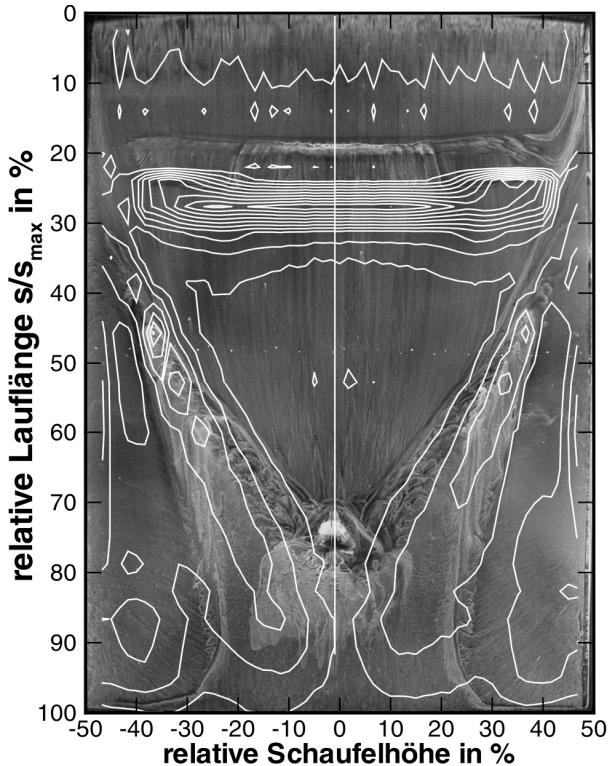


Bild 10. RMS-Isolinien und Ölanstichbild für $Re_c = 840\,000$

4. ERSTE ERGEBNISSE MIT AKTIVER BEEINFLUSSUNG

Anhand erster Versuche zur aktiven Beeinflussung der dominanten Eckenwirbel auf der Schaufelsaug-

seite soll die Eignung des RMS-Wertes der Druckschwankungen p' zur Charakterisierung der Strömungsstrukturen demonstriert werden. Für diese Versuche wurden Druckluftaktuatoren in die Kaskadenseitenwände integriert, um die Eckenwirbel durch stationäres Einblasen aktiv zu beeinflussen. Die Einblasung erfolgt durch einen rechteckigen

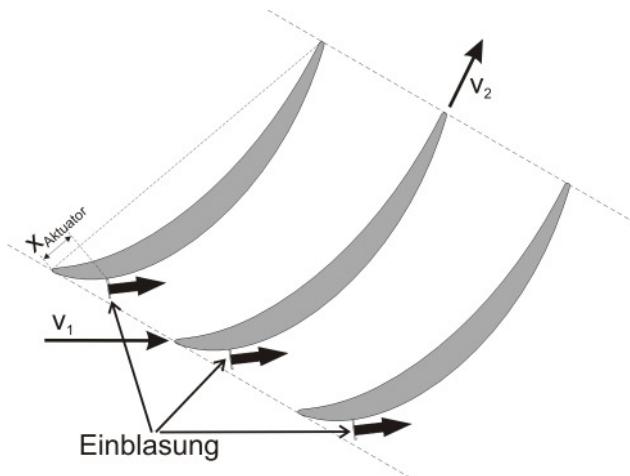


Bild 11. Aktive Beeinflussung der Eckenwirbel

Schlitz bei 15% der Saugseitenlauflänge. Bild 11 zeigt die Konfiguration der Seitenwandaktuatorik. Die schwarzen Pfeile geben die Einblasrichtung an. Der Winkel zwischen der Aktuatoraustrittsstellung und dem Profilschnitt beträgt 90° , der Einblaswinkel des Luftstrahls zur Seitenwand beträgt 15° . Der Winkel wurde so gewählt, um eine möglichst hohe Effektivität der Beeinflussung zu erreichen. Der flache Winkel soll bewirken, dass sich in Wandnähe ein Unterdruckgebiet durch die Geschwindigkeitsüberhöhung des Strahls ausbildet, welches den Eckenwirbel zur Wand hin umlenkt. Zum anderen wird die Druckluft direkt in den Wirbelkern eingeblasen, um die Strukturen des Wirbels auszulöschen. Zur Erhaltung der symmetrischen Strömungsbedingungen in den einzelnen Passagen der Kaskade, wurden in allen sechs Passagen gleichmäßig aus beiden Seitenwänden Druckluft eingeblasen. Die Druckluftzufuhr für jeden der 12 Aktuatoren wird fortlaufend überwacht und durch separate Ventile gesteuert. Das Ergebnis einer ersten Messung ist in Bild 12 gezeigt. Dargestellt ist die Verteilung des RMS-Wertes nach Gleichung (2) für die Saugseite. Die Auftragung erfolgte wie in den zuvor gezeigten Darstellungen über der relativen Lauflänge der Saugseite und der relativen Schaufelhöhe. Für den direkten Vergleich der unbeeinflussten Strömung und den Fall mit aktiver Beeinflussung wurde auf der rechten Seite das Ergebnis der Grundströmung aufgetragen und dem der beeinflussten Strömung gegenübergestellt. Die Schwankungsintensität beider Messungen wurde mit dem Maximalwert für den unbeeinflussten Fall normiert. Der weiße Pfeil auf der rechten Seite der Abbildung zeigt die Position und die Eintrittsrichtung des Luftstrahls zur Beeinflussung der Eckenwirbel.

In der gezeigten Messung wurde Druckluft mit 3 bar eingeblasen. Dies entspricht einem Volumenstrom von 55 l/min je Aktuator. Die beiden Bildhälften zeigen einen deutlichen Unterschied in der Schwankungsintensität. Die einheitliche Normierung ermöglicht einen Vergleich der Beträge für die beiden Strömungsfälle. Hier wird deutlich, dass die RMS-Werte in der linken Bildhälfte deutlich geringer sind. Neben der Abnahme der Beträge der RMS-Werte zeigen sich deutliche Unterschiede im Bereich des Eckenwirbels. Das keulenförmige Gebiet erhöhter Schwankungsintensität der Grundströmung wird durch das stationäre Einblasen aufgebrochen, so dass die lokalen Maxima zwischen 40% und 60% der Saugseitenlauflänge vollständig verschwinden. Die Lage der laminaren Ablöseblase bleibt hingegen von der Aktuatorik weitgehend unbeeinflusst. Der Vergleich weist keine Verschiebung der turbulenten Wiederanlegelinie auf. Die Reduzierung der Schwankungsintensität im Bereich der Eckenwirbel lässt sich aus diesem Grund direkt auf die aktive Beeinflussung zurückführen. Für die aktiven Beeinflussungskonzepte zur Unterdrückung der starken Sekundärströmungseffekte und die Strömungsablösungen im hinteren Schaufelbereich stellt der RMS-Wert der Wanddruckdaten ein gut geeignetes Kriterium zur Beurteilung der Beeinflussungseffektivität dar. Die schnelle Auswertung der Messergebnisse erlaubt eine breite Variation der Beeinflussungsparameter. Zur quantitativen Beschreibung der Beeinflussungseffektivität werden ergänzend dazu Nachlaufmessungen durchgeführt, um die relevanten Parameter bestimmen zu können. Die Schwankungsintensität trägt ihrerseits zur Klärung der Strömungsvorgänge an der Schaufel bei. Darüber hinaus geben die Ergebnisse Auskunft darüber, in welchen Bereichen Feldmessverfahren, wie z.B. die zeitaufgelöste PIV, eingesetzt werden sollten.

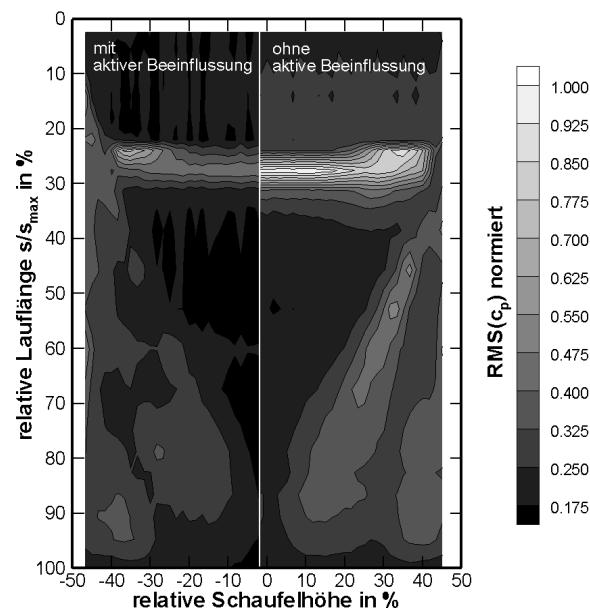


Bild 12. Vergleich der Strömung für stationäres Ausblasen anhand des RMS-Wertes der Druckschwankungen p'

5. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein neuer Kaskadenprüfstand aufgebaut, an dem Versuche zur aktiven Beeinflussung von Sekundärströmungen und zur Ablösekontrolle durchgeführt werden können. Die Strömung für den unbeeinflussten Fall wurde mit dem Verfahren des Ölanstriches und zeitaufgelösten Druckmessungen auf der gesamten Schaufeloberfläche eingehend vermessen. Diese Methoden wurden eingesetzt, da sie eine schnelle Vermessung des wandnahen Strömungsfeldes ermöglichen. Durch die hohe aerodynamische Belastung der Kaskadenströmung bildet sich ein stark dreidimensionales Strömungsfeld auf der Schaufelsaugseite aus. Das geringe Schaufelhöhenverhältnis von $h/L = 0,8$ verursacht dominante Sekundärströmungen, die einen erheblichen Einfluss auf die Strömungsverluste ausüben. Ziel der Messungen war die Erfassung dieser Strömungsphänomene mit Hilfe wandgebundener Messverfahren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungsbedingungen an der Kaskade homogen und symmetrisch sind. Beide Messverfahren sind zudem in der Lage, die komplexen Strömungsverhältnisse an den Schaufeln gut aufzulösen. Der Ölanstrich zeigt deutlich die Ablösegebiete an den Statorschaufeln. Die Druckmessungen liefern zudem quantitative Ergebnisse der Schaufelumströmung. Die flächige Vermessung des Druckfeldes zeigt ebenfalls den Einfluss der Sekundärströmungseffekte auf die Druckverteilung. Die Kombination der beiden unterschiedlichen Messverfahren hilft bei der Interpretation der Druckmessung. Ein deutlicheres Bild der Strömungsvorgänge ergibt sich aus der Betrachtung der Schwankungsintensität, deren Berechnung über den RMS-Wert erfolgt. Die Kombination von Ölanstrichbild und Schwankungsintensität zeigt die gute Eignung des RMS-Wertes zur Bewertung der Strömungsstrukturen auf der Saugseite der Schaufeln. Die Entwicklung und Lage der Eckenwirbel ist in dieser Darstellung deutlich zu erkennen. Erste Messungen zur aktiven Strömungskontrolle bestätigen die Eignung des RMS-Wertes als Bewertungsgröße für die dominierenden Strömungsstrukturen an den Schaufeln.

6. LITERATUR

- [1] Rolls-Royce plc (1986) The Jet Engine, Renault printing Co. Ltd.
- [2] Matejka, M.; Safarik, P.; Popelka, L.; Nozicka, J. (2008), Influence of Active Methods of Flow Control on Compressor Blade Cascade Flow, ASME Turbo Expo 2008

- [3] Mertens, D.; Thiele, F.; Swoboda, M.; Huppertz, A. (2008), Transition Modeling Effects on the Simulation of a Stator Cascade with Active Flow Control, ASME Turbo Expo 2008
- [4] Elsinga, G.E.; Scarano, F.; Wieneke, B.; van Oudheusden, B.W. (2005), Tomographic particle image velocimetry, 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, September 21-23
- [5] Burgmann, S.; Dannemann, J.; Schröder, W. (2007), Time-resolved and volumetric PIV measurements of a transitional separation bubble on an SD7003 airfoil, Experiments in Fluids,
- [6] Nitsche, W.; Brunn, A. (2006), *Strömungsmesstechnik*, Springer.
- [7] Nerger, D.; Saathoff, H.; Radespiel, R. (2007); Experimental and Numerical Analysis of a Highly Loaded Low Aspect Ratio Compressor Stator Cascade, Proceedings of 7th European Conference on Turbomachinery, Athens, Greece, pp. 429–439

7. DANKSAGUNG

Die Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland im Rahmen des EU Forschungsprojektes TATMo (framework 6) unter der Vertragssnummer AST5-CT-2006-030939 durchgeführt. Wir danken dem TATMo Konsortium und Rolls-Royce Deutschland für die Erlaubnis zur Veröffentlichung.