

TECHNOLOGIE ZUR AERODYNAMISCHEN OPTIMIERUNG DES 3D-STRÖMUNGSKANALS IN TURBINEN

I. Raab, T. Germain, J. Gier
MTU Aero Engines GmbH
Dachauer Str. 665, 80995 München
Deutschland

Zusammenfassung

In Niederdruckturbinen machen Strömungsverluste in der Nähe von Nabe und Gehäuse bis zu einem Drittel der gesamten Strömungsverluste aus und haben so einen erheblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Triebwerks. Mit geeigneter dreidimensionaler Gestaltung des Strömungskanals können diese Sekundärströmungsverluste reduziert werden. MTU unternimmt seit Jahren große Anstrengungen, dieses Verbesserungspotential weiter auszuschöpfen. Das Projekt „3D Flow Control“ hat sich speziell mit der aerodynamischen Optimierung von Schaufelplattformen und Deckbändern beschäftigt und damit eine Technologie entwickelt, die zur Verminderung der Sekundärströmungsverluste beiträgt.

Das vorliegende Paper beschreibt die strömungsphysikalischen Grundlagen der Seitenwandkonturierung und zeigt den von MTU gewählten aerodynamischen Auslegungsprozess auf. Dazu wurde ein automatisierter Optimierungsprozess als Teil eines integrierten CAD-Auslegungsprozesses entwickelt. Die experimentelle Überprüfung der so generierten dreidimensionalen Gestaltung umfasst mehrere Kaskadengitter sowie zwei Aufbauten einer Modellturbine der ETH Zürich. Den Abschluss bildete der Rigtest einer dreistufigen triebwerksnahen Versuchsturbine im Höhenprüfstand der Universität Stuttgart. Das Paper zeigt Ergebnisse der verschiedenen Tests, in denen teilweise eine deutliche Verbesserung des Turbinen-Wirkungsgrads realisiert werden konnte.

1. EINLEITUNG

Die Gestaltung des Strömungskanals einer Turbomaschine besteht traditionell aus zwei Teilen. Während der sogenannte Ringraum eine idealisierte Stromröhre darstellt, deren radialer Verlauf in erster Linie den Erfordernissen des Kreisprozesses folgt, ergibt sich die Beschaukelung der einzelnen Stufen aus der gewählten Arbeitsaufteilung und der Umlenkungsaufgabe.

Ausgehend von rein zylindrischen radial stehenden Schaufeln wurde zunächst damit begonnen, die Schaufeln den variierenden Strömungsverhältnissen über der Schaufelhöhe anzupassen, um durch die Verwindung des Schaufelblattes eine Verringerung der Fehlanströmungen zu erzielen. Dejc und Trojanovskij [1] untersuchten wie durch unterschiedliche Fädelung der Schaufelschnitte in Umfangsrichtung der radiale Druckgradient beeinflusst werden kann. Pioske und Gallus [2] fanden in einer CFD-gestützten Parameterstudie zur radialen Fädelung die Möglichkeit zur Reduktion der Gesamtverluste. Auch Kombinationen aus sogenannten Lean- und Bow-Schaufeln haben sich als sehr effektiv erwiesen, um die radiale Belastungsverteilung zu verändern (Chen [3]).

Mit den größer werdenden Steigungswinkeln der Ringräume in Niederdruckturbinen wurde auch die Frage nach dem Einfluss des sogenannten Sweeps, also der lokalen oder globalen Pfeilung des Schaufelblatts in axialer Richtung relevant. Eine grundlegende Arbeit hierzu stammt von Pullan [4], welche die verschiedenen physi-

kalischen Einflüsse in Bezug auf Primär- und Sekundärströmungsverluste analysiert.

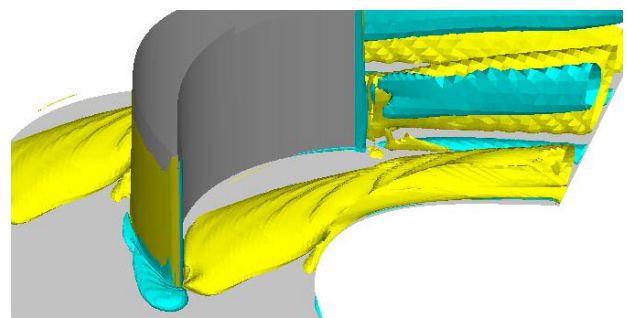


BILD 1. Wirbelstrukturen der Sekundärströmung in Seitenwandnähe eines Schaufelkanals

Unter Sekundärströmung werden dabei die dreidimensionalen Strömungsphänomene verstanden, die aufgrund des Geschwindigkeitsdefizits im wandnahen Bereich entstehen und sich aufgrund der vorhandenen Druckgradienten zu charakteristischen Wirbelstrukturen aufrollen (vgl. Langston [5]). BILD 1 zeigt exemplarisch die Interaktion von Hufeisenwirbel und Kanalwirbel wie sie sich in einem Schaufelkanal in Seitenwandnähe typischerweise ausbildet.

Neben den steilen Ringräumen hat auch die zunehmende

Schaufelbelastung in modernen Turbomaschinen zu einer Fokussierung auf die daraus resultierenden größeren Sekundärströmungsverluste geführt. Duden et al [6] und Gier et al. [7] beschreiben, wie man durch dreidimensionale Aufdickung der Schaufelendbereiche die Randströmung positiv beeinflussen kann, während Sauer und Wolf [8] über die bugförmige Gestaltung der Vorderkante eine Verringerung des Kanalwirbels erzielen wollen.

Schließlich konzentriert sich die Forschung seit Anfang der 90er Jahre auch auf die dreidimensionale Gestaltung der Schaufelplattformen. Rose [9] nutzt die umfangsymmetrische Konturierung der Seitenwände im Stator einer Hochdruckturbine zur Vergleichmäßigung des statischen Druckfeldes am Gitteraustritt, was zu einem Anstieg des Gesamtwirkungsgrades führt. Pioske [10] führt eine rein theoretische Auslegung mit Hilfe der Strömungssimulation durch, in der er die Seitenwandkonturierung für eine Bow-Schaufel untersucht. Weitere erfolgreiche Anwendungen finden sich bei Harvey et al. [11], Rose et al. [12], Nagel und Baier [13], Ardey und Gier [14] und Praisner et al. [15].

Während die Zielsetzung der Seitenwandkonturierung die Reduzierung der Sekundärströmungsverluste ist, werden für die zielgerichtete Auslegung und die Interpretation der Wirkungsweise unterschiedliche Ansätze gewählt. Gregory-Smith et al. [16] zielen in ihrer Auslegung auf die Reduktion der Sekundären Kinetischen Energie (SKE) über die Beeinflussung des lokalen Druckfeldes auf der Seitenwand. Germain et al. [17] betonen darüber hinaus auch die Verringerung des Querdruckgradienten, der verantwortlich für die Anfachung der Sekundärströmung ist. Einen interessanten Ansatz zur Veranschaulichung der strömungsphysikalischen Vorgänge findet sich auch bei Kasper et al. [18], die mit Hilfe der Strömungssichtbarmachung in einer rotierenden Wasserturbine Seitenwandkonturen untersuchen.

2. TECHNOLOGIEENTWICKLUNG DER MTU ZUR SEITENWANDGESTALTUNG

Aufbauend auf den oben genannten Forschungsarbeiten zur dreidimensionalen Gestaltung der Schaufeln und des Ringraumes hat MTU nun ein Projekt durchgeführt, dass die systematische Entwicklung der Technologie zur Seitenwandkonturierung zum Ziel hatte (vgl. auch Gier et al. [19]). Dazu gehört neben der Vertiefung des physikalischen Verständnisses vor allem auch die Erarbeitung eines Auslegungsprozesses. Das beinhaltet die mathematische Formulierung der Konturierung, die Definition geeigneter Zielgrößen und einen Algorithmus zum Auffinden optimaler Lösungen (vgl. [17]).

2.1. Auslegungsprozess

Die Parametrisierung der Seitenwände erfolgt „object-orientiert“, das heißt, verschiedene Erhöhungen und Vertiefungen können individuell platziert und überlagert werden. Sie sind definiert über Amplitude, Position und Krümmungseigenschaften. Jedes dieser Objekte wird durch eine axiale Abklingfunktion und eine Formfunktion in Umfangsrichtung beschrieben, welche etwa fünfzehn Parameter umfassen. Diese Parametrisierung ermöglicht es, Strömungsstrukturen gezielt zu beeinflussen, da ein Konturobjekt an einer bestimmten Region positioniert werden kann.

Diese Vorgehensweise hat sich als sehr effektiv herausgestellt, weil dadurch auf die jeweiligen Besonderheiten jeder Turbinenpassage eingegangen werden kann. Darüber hinaus ist die Übertragung der Kontur von einer Plattform auf eine andere sehr einfach durchzuführen, indem sie auf dem Einheitsquadrat definiert und anschließend auf den Schaufelkanal transformiert wird (BILD 2).

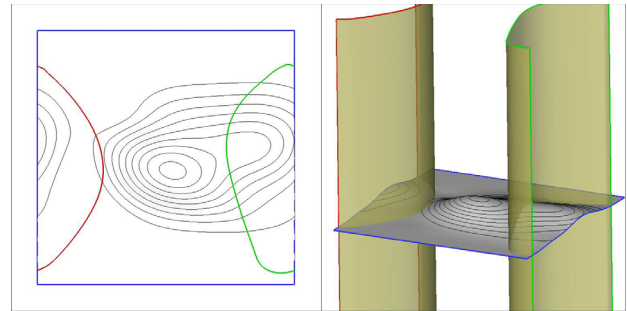


BILD 2. Definition der Seitenwandkontur auf dem Einheitsquadrat

Aufgrund der Komplexität der Designaufgabe erfolgt die Auslegung der Seitenwände mittels automatischer Optimierungsalgorithmen. So werden die nicht-axialsymmetrischen Naben- und Gehäuseflächen mit einem gradientenbasierten Algorithmus optimiert.

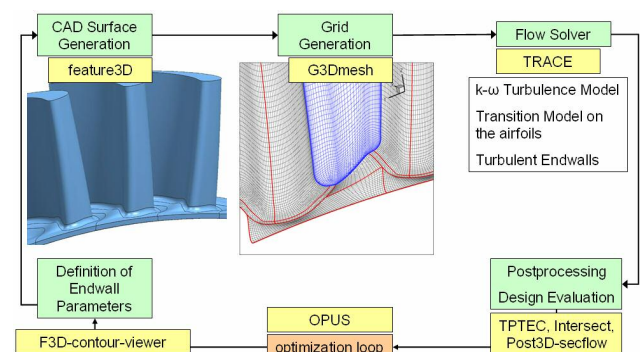


BILD 3. Ablauf des Optimierungsprozesses

Bei der aerodynamischen Auslegung wurde erstmals auch ein automatisierter Optimierungsprozess angewendet. Durch wiederholte Änderung der auf CAD basierenden Geometrie soll eine Verbesserung der komplexen dreidimensionalen Strömungsanteile erzielt werden. Dazu wird der mit dem 3D-CFD-Verfahren TRACE berechnete Strömungszustand anhand einer vorgegebenen Zielfunktion bewertet (vgl. BILD 3). Als Zielfunktion dieser Optimierung werden sowohl Totaldruckverluste als auch die Sekundäre Kinetische Energie betrachtet, während der gemittelte Austrittsströmungswinkel und der Massendurchsatz als Randbedingungen festgelegt werden.

2.2. Experimentelle Überprüfung

Trotz der großen Fortschritte auf dem Gebiet der Strömungsberechnung bedarf gerade die numerische Optimierung einer Validierung ihrer Zielgrößen. Dazu wurden zahlreiche Experimente mit steigendem Komplexitätsgrad durchgeführt.

2.2.1. Kaskaden

Ausgehend von dem Kaskadengitter T160 (vgl. TAB 1) wurden zwei neue Kaskaden definiert, indem die divergenten Seitenwände mit zwei verschiedenen Konturierungen versehen wurden. BILD 4 zeigt das Gitter mit den beiden neu ausgelegten Seitenwänden T160-K1 und T160-K2.

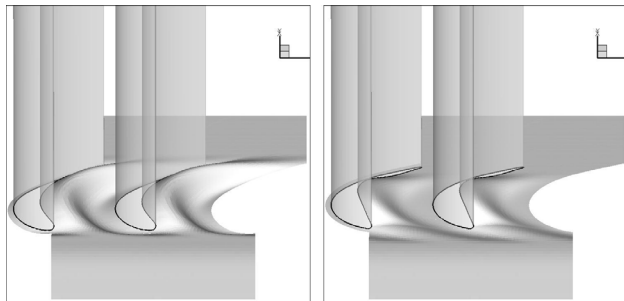


BILD 4. Topologie der Kaskaden T160 K1 und K2

Die beiden Konturen zeichnen sich durch eine verlängerte Saugseite und eine verkürzte Druckseite aus, d.h. eine Vertiefung entlang der Saugseite steht einer Erhöhung auf der Druckseite gegenüber. Die Kontur K1 streckt sich bis weit in den Engflächenbereich hinein, während sich die Kontur K2 nur im vorderen Bereich der Schaufel ausdehnt. Beide Konturen starten stromaufwärts der Vorderkanten. Die Amplituden betragen etwa +/-10% der Sehnenlänge.

Schaufelhöhenverhältnis	H/l_{ax}	3
Umlenkung	$\Delta\beta_s [^\circ]$	105-110
Sehnenlänge	$l [mm]$	66.7
Anzahl Schaufeln	$n [-]$	7

TAB 1. Kennzahlen der Kaskade T160

Die beiden Gitter wurden im Hochgeschwindigkeits-Gitterwindkanal der Universität der Bundeswehr München detailliert vermessen. Es wurden Untersuchungen des Profildruckes bei 12% und 50% relativer Schaufelhöhe durchgeführt, ebenso Nachlaufmessungen mit einer geraden Fünf-Loch-Sonde. Dazu Feldtraversierungen im Nachlauf und in verschiedenen Nachlaufmesebenen, ebenfalls mit einer geraden Fünf-Loch-Sonde. Die stationäre Zuströmung wurde in Betrag und Richtung mit Hilfe der 3D-Hitzdraht-Anemometrie vermessen.

Zur Untersuchung des Gitters bei verschiedenen Betriebspunkten wurden Winkel-, Machzahl- und Reynoldszahlvariationen durchgeführt. Aufgrund der umfangreichen Messmatrix konnten sehr genaue Verlustmessungen zur Wirkungsgradbestimmung durchgeführt werden.

2.2.2. LISA-Turbine

Als nächster Schritt folgten zwei Auslegungen einer Versuchsturbine der ETH Zürich (BILD 5 und TAB 2). Die Turbine war dazu mit einer 1,5-stufigen hochdruck-turbinen-typischen Beschaufelung aufgebaut und als Bezugsbasis vermessen worden (Behr et al. [20]). Die umfangunsymmetrische Seitenwandkonturierung wurde für die Deckbänder des ersten Stators und die Naben-

plattform des deckbandlosen Rotors eingeführt, während die Schaufelblätter unverändert belassen wurden.

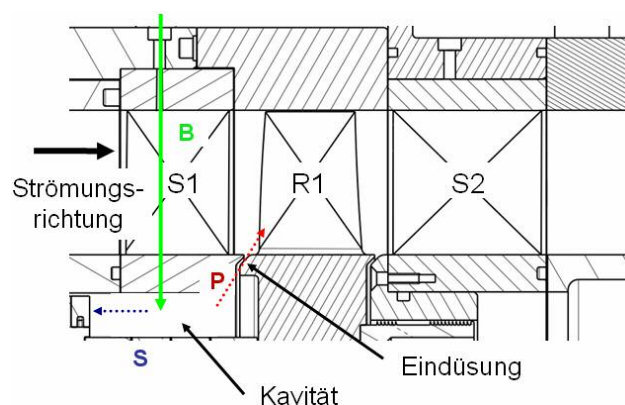


BILD 5. LISA-Turbine (Schüpbach et al. [20])

Bei den beiden Auslegungen wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Der erste Aufbau konzentrierte sich auf die Verbesserung der Durchströmung des Eintrittsleitrades, da hier aufgrund der Gitterbreite starke Sekundärströmungen angefacht werden, deren Wirbelsysteme zu Ausmischungsverlusten in den Folgegittern führen. Die Kapazitätsanpassung wurde über ein Umstaffeln der Gitter gegenüber der Basis erreicht. Bei dem zweiten Aufbau wurde insbesondere auf eine Homogenisierung der Rotorzuströmung geachtet, um auch eine Anfackung der Spaltströmung an der Schaufelspitze zu vermeiden. Hier sollte die Konturierung so ausgeführt werden, dass die Umstaffelung gegenüber dem ersten Aufbau wesentlich reduziert werden konnte. Die Isoliniendarstellungen der drei Seitenwandkonturen für LISA-1 finden sich in BILD 6.

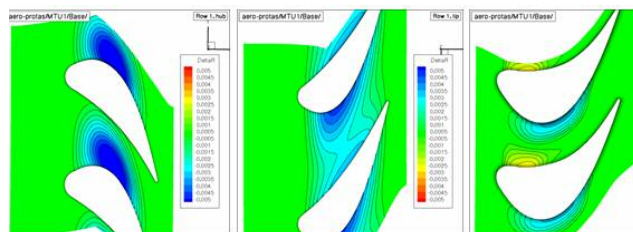


BILD 6. Topologie der Auslegung LISA-1; Stator1-Nabe, Stator1-Gehäuse, Rotor-Nabe

Mit dem Übergang auf eine Versuchsturbine konnte die Seitenwandkonturierung in einer realistischeren Mehrgitter-Umgebung getestet werden, ohne auf detaillierte Messungen verzichten zu müssen. Neben den stationären Messungen durch Traversierung mit 5-Loch-Sonden in der Zu- und Abströmung wurden auch hochgenaue instationäre Messungen mit FRAP-Sonden in allen Axialspalten durchgeführt.

Durch Variation des Leckagemassenstroms, der in BILD 5 als Eindüsung gekennzeichnet ist, konnte darüber hinaus die Sensitivität der Plattformkonturierung gegenüber Sekundärlufteinblasung und -absaugung studiert werden. Die Messmatrix umfasste standardmäßig für beide Aufbauten Kennfeldmessungen, die durch den Vergleich mit der Referenzturbine genaue Analysen des Konturierungseinflusses aufzeigten.

Axial Chord	[mm]	50.0
Hub Radius	[mm]	330.0
Tip Radius	[mm]	400.0
# Blades Stator 1	[-]	36
# Blades Rotor 1	[-]	54
# Blades Stator 2	[-]	36
Rotational Speed	[rpm]	2700.0
Massflow	[kg/s]	12.1
Pressure Ratio	[-]	1.5
Absolute Inlet Angle	[-]	0°
Absolute Exit Angle Stator 1	[-]	71°
Relative Exit Angle Rotor 1	[-]	67°
Absolute Exit Angle Stator 1	[-]	66°

TAB 2. Parameter der LISA-Turbine (vgl. Behr et al. [18])

2.2.3. Triebwerks-Rig

Im Hinblick auf den Einsatz der umfangsunsymmetrischen Seitenwandkonturierung im Triebwerk war die Untersuchung eines Niederdruckturbinenrigs bei realistischen Machzahlen und unter triebwerkstypischen Druckverhältnissen interessant. Dazu wurde in einem weiteren Schritt ein 3-stufiges NDT-Rig aufgebaut und im Höhenprüfstand der Universität Stuttgart erprobt. Dabei wurde die Seitenwandkonturierung in alle Schaufelplattformen und Deckbänder der NDT eingebracht.

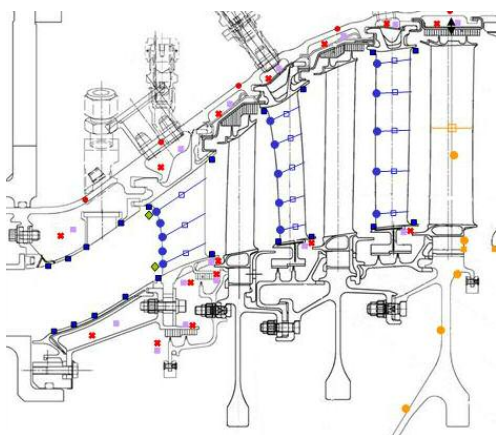


BILD 7. 3-Stufen-Rig mit Instrumentierungsübersicht

Zur Herstellung der Konturierung wurde die bestehende Triebwerksbeschaufelung modifiziert, indem Vertiefungen durch Erodierung abgetragen und Erhebungen durch Aufkleben erzeugt wurden (vgl. [19]). BILD 7 zeigt ein Schnittbild der Turbine, BILD 8 das fertig montierte Turbinenmodul.

Eine zusätzliche Randbedingung bei dieser Auslegung ergab sich aus der Tatsache, dass der Rigaufbau keine Umstaffelung der Schaufeln erlaubte, so dass die Einhaltung der Kapazität allein über die Seitenwandkontur sichergestellt werden musste. Das erfordert auch die Einbeziehung der Ausrundungsradien in die Seitenwandgestaltung als Teil der zu optimierenden Topologie.



BILD 8. Rigaufbau für den Höhenprüfstand Stuttgart

Das Versuchsprogramm umfasste Kennfeldmessungen bei mehreren Reynolds-Zahlen - dem Kennwert für die Flughöhe - sowie Sekundärluftvariationen. Dazu verfügte das Rig über ein Sekundärluftsystem zur Variation des Sekundärmassestroms.

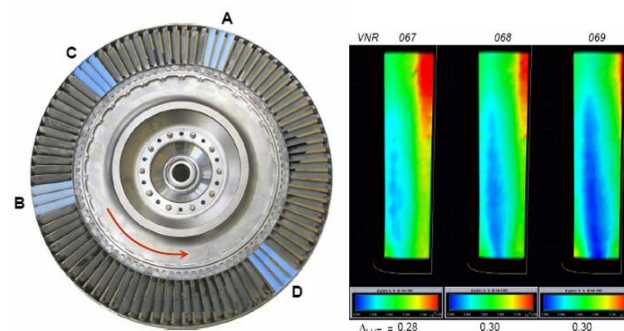


BILD 9. Messung mit Drucksensitiven Farben

Zur Bestimmung der Performance-Daten der modifizierten Beschaufelung wurde das Rig umfangreich instrumentiert (BILD 7). Zur genaueren Analyse der seitenwandnahen Schaufelbereiche wurden dort zusätzliche Druckmessstellen eingebracht. Darüber hinaus erfolgten Messungen mit Grenzschichtsensoren und drucksensitiven Farben (Bild 9). Wichtige Erkenntnisse zur 3D-Struktur der Strömung und zum Transitionsverhalten werden auch aus der durchgeführten Sichtbarmachung der Strömung abgeleitet.

3. ERGEBNISSE

Im Folgenden soll keine umfassende Darstellung der zahlreichen Versuchsergebnisse gegeben werden, vielmehr werden einige interessante Aspekte näher beleuchtet. Darüber hinausgehende Darstellungen der Ergebnisse finden sich bei Germain et al. [17], Germain et al. [21], Schüpbach et al. [22] und Schüpbach et al. [23].

3.1. Validierung

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, sollen durch die Beeinflussung des Seitenwanddruckfeldes die Sekundärströmungen so modifiziert werden, dass die resultierenden Strömungsverluste abnehmen. Zur Absicherung der CFD-basierten automatisierten Optimierung muss also sowohl die Wirksamkeit der Optimierungsstrategie nachgewiesen werden als auch die Berechnung der Zielkriterien überprüft werden. Die Basisversuche im Hochgeschwindigkeits-Gitterwindkanal waren dazu geeignet, die grundlegende Auslegungsstrategie zu überprüfen.

In BILD 10 sind die berechneten Verteilungen der Totaldruckverluste am Gitteraustritt dargestellt. Man erkennt gut den zweidimensionalen Nachlauf aufgrund des großen Schaufelhöhenverhältnisses sowie die dreidimensionalen Verlustzentren in der Nähe der Seitenwände. Sie zeigen die Lage der eingangs angesprochenen Wirbelsysteme an, die sich aufgrund der Seitenwandgrenzschichten als Sekundärströmung ausbilden. Die Simulation zeigt, dass die Konturierung der Seitenwand zu einer Veränderung von Lage und Intensität der Wirbelsysteme führt, die dem Designer eine physikalische Interpretation des Strömungszustandes erlauben.

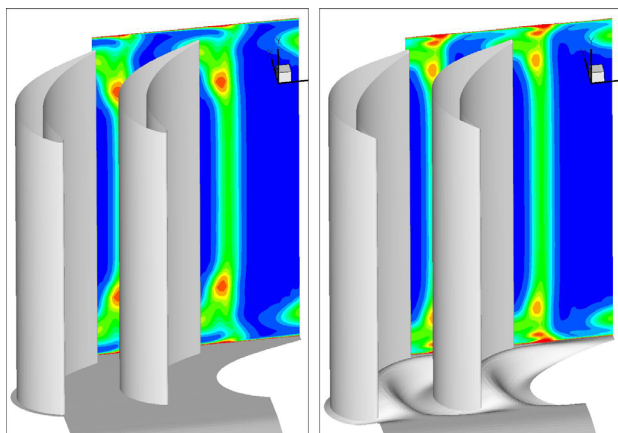


BILD 10. Berechnete Isolinien des Totaldruckverlustes in der Austrittsebene von T106 und T106-K1

Ein Vergleich zwischen Berechnung und Messung des Konturierungseinflusses ist in BILD 11 zu sehen. Dargestellt sind die radialen Verteilungen von Totaldruckverlust und Strömungswinkel am Gitteraustritt. Man erkennt im Vergleich mit dem Basisgitter mit ebener Seitenwand, dass die beiden Konturierungen zu einer Verlagerung der Verlustzentren in Richtung Seitenwand führen. Dabei werden sowohl deren Lage als auch die Höhe der Verluste sowie die resultierende Über- und Unterumlenkung tendentiell richtig wiedergegeben.

Zusammenfassend kann für die Kaskaden gesagt werden, dass die Sekundärströmungsstrukturen und ihre Reaktion auf die Geometrieänderung in der Rechnung richtig erfasst werden. Die exakte Höhe der Verluste wurde dagegen nicht in jedem Fall getroffen.

Auch die Anwendung der Seitenwandkonturierung für zwei Aufbauten der 1,5-Stufigen LISA-Turbine zeigt die Wirksamkeit der oben beschriebenen Auslegungsstrategie. Im Falle der Konturierung LISA-1 konnte sogar der Stufenwirkungsgrad um 1% gesteigert werden. Dieser

Wert übertraf damit deutlich die Vorhersage der Verlustreduktion.

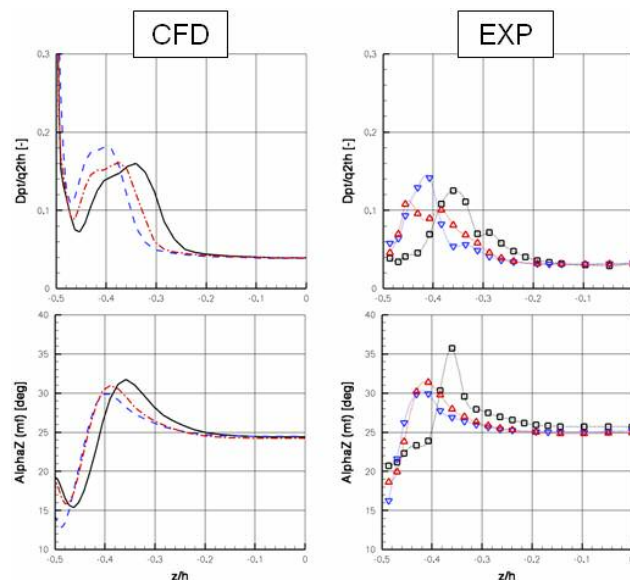


BILD 11. Berechnete und gemessene Radialverteilungen für Totaldruckverlust und Abströmwinkel (Basis, blau: K1, rot: K2)

Gründe für die überraschend hohe Wirksamkeit der Seitenwandkonturierung in LISA-1 sollen anhand von BILD 12 kurz diskutiert werden. Dort ist wiederum die radiale Verteilung des Totaldruckverlustes am Austritt des 1. Stators dargestellt. Es fällt auf, dass in der Simulation die Verlustzone in Gehäusenähe für die Basisturbine und die konturierte Ausführung stark überbewertet wird. Wichtiger für die Seitenwandauslegung ist aber die Tatsache, dass die Konturierung zu einer Änderung der Kernströmung führt, die von der Rechnung nicht vorhergesagt wird.

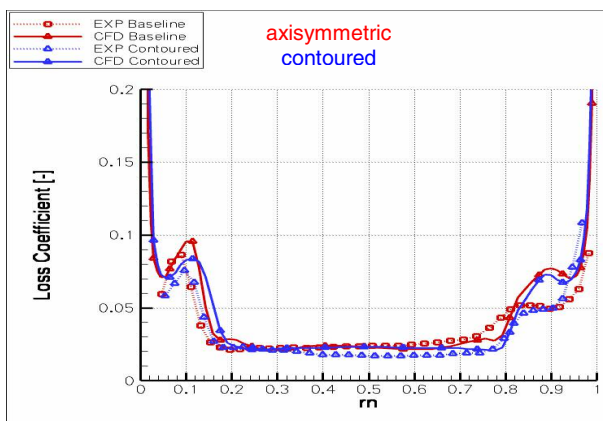


BILD 12. Verlustverteilungen am Austritt des 1. Stators

Eine genauere Analyse der Wandstromlinien auf der Saugseite des 1. Leitrades (BILD 13) legt den Schluss nahe, dass es aufgrund der Konturierung zu einer Änderung der Strömungsstruktur über der gesamten Schaufelhöhe kommt. Die starke radiale Bewegung der Sekundärströmung in der Referenzturbinen wird aufgrund der Konturierung des Deckbandes verringert, was zu einem verringerten Verlustniveau in der Kernströmung führt. Aufgrund des niedrigen Schaufelhöhenverhältnisses ist dort nicht mehr ein zweidimensionaler Strömungszustand anzutreffen.

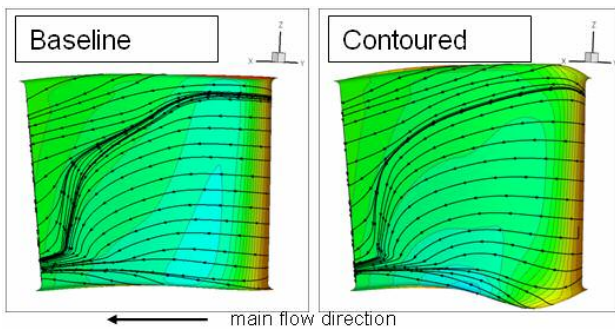


BILD 13. Radiale Migration am Eintrittsleitrad LISA-1

Aktuelle Untersuchungen lassen vermuten, dass eine Verbesserung der CFD-Simulation durch verstärkte Anstrengungen bei der Transitionsmodellierung zu erzielen sein könnte. Dabei muss zum einen die Berechnung des Grenzschichtumschlags verbessert werden. Zum anderen muss auch die Grenzschichtentwicklung auf der Seitenwand genauer erfasst werden. Vera et al. [24] haben in aufwendigen Heißfilmmessungen transitionale Vorgänge auf den Seitenwänden eines NDT-Rigs untersucht, die demzufolge nicht als vollturbulent angesehen werden können.

3.2. Überprüfung im Triebwerks-Rig

Zur Klärung der Frage nach der optimalen Seitenwandkontur wurden für die Kaskadentests und die LISA-Turbine jeweils zwei unterschiedliche Topologien untersucht. Dabei wurden sowohl verschiedene Ausdehnungen der Konturierung eingebracht als auch die Überlagerung mehrerer Wellen in Strömungsrichtung zur Erfüllung unterschiedlicher Randbedingungen getestet. Für das Engine-Rig wurde eine Topologie ausgewählt, die den oben genannten Randbedingungen aus der Verwendung der vorhandenen Triebwerksbeschaufelung genügte.

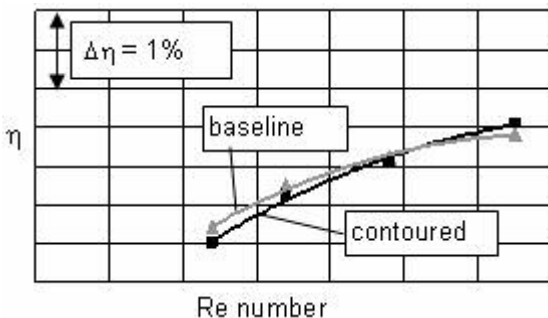


BILD 14. Wirkungsgrad über Reynoldszahl für das 3-stufige NDT-Rig

In BILD 14 ist die Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrads der Turbine von der Reynoldszahl für die Designrehzahl dargestellt. Der Vergleich mit der Basisturbine zeigt die stärkere Reynoldszahl-Abhängigkeit des Aufbaus mit konturierten Deckbändern und Plattformen. Während der Wirkungsgradgewinn für hohe Reynoldszahlen bis zu 0,2% beträgt, kommt es bei niedrigeren Werten zu einem schlechteren Abschneiden des konturierten Moduls.

Eine Ursache für dieses unerwünschte Verhalten kann in BILD 15 analysiert werden. Die Aufnahme der Strömungssichtbarmachung im Eintrittsleitgitter deutet auf eine Ablösung am Deckband für die niedrigste Reynolds-

zahl hin. Die daneben abgebildete CFD-Lösung berechnet eine starke Strömungsverzögerung, die aber nicht zur Ablösung kommt. Das Ergebnis zeigt, wie wichtig daher die Bewertung der Seitenwandgestaltung im Hinblick auf wechselnde Betriebspunkte ist, wobei berücksichtigt werden muss, dass die vollturbulente CFD-Rechnung nicht immer zuverlässige Werte für den Seitenwandbereich liefert. Die Auslegung der Konturierung sollte in diesem Fall deutlich konservativer gewählt werden, indem große Gradienten vermieden werden.

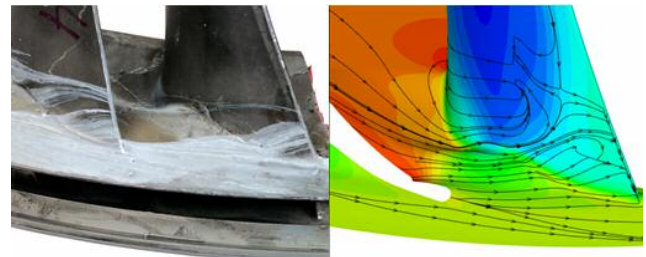


BILD 15. Strömungssichtbarmachung und berechnete Gehäusewandströmung im Eintrittsleitrad

Während sich daher die Konturierung der Seitenwand des Eintrittsleitrades daher bei niedrigen Reynoldszahlen eher negativ auswirkt, zeigt die Auslegung der hinteren Stufen den gewünschten Erfolg. BILD 16 gibt den radialen Verlauf des Wirkungsgrades bei hohen Reynoldszahlen wieder. Hier ist insbesondere im Gehäusebereich eine deutliche Abnahme der Verluste durch die Deckbandkonturierung zu erkennen. Die geringfügige Störung bei 40% Schaufelhöhe, die vermutlich wieder aus den Strömungsverlusten im Eintrittsleitrad resultiert, ist in diesem Fall aber nicht mehr dominant.

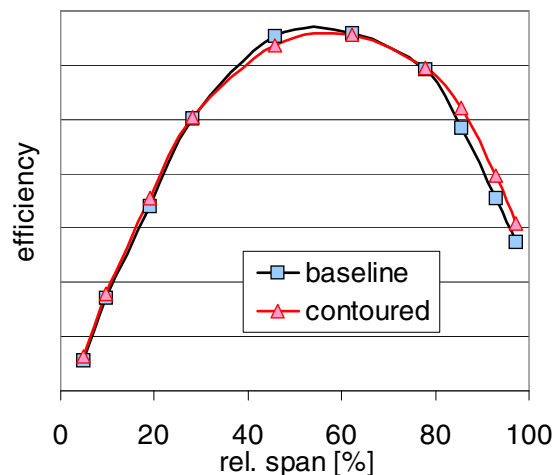


BILD 16. Radiale Verteilung des Wirkungsgrades bei hohen Reynoldszahlen

In BILD 17 ist noch die Profildruckverteilung für den Nabenbereich des Eintrittsleitrades bei verschiedenen Betriebspunkten im Vergleich zur Basisturbine dargestellt. Man erkennt auch hier die grundlegend geänderte Belastungsverteilung, die durch die lokale Konturierung der Seitenwand hervorgerufen wird.

Die Seitenwandkonturierung hat sich in allen Versuchsträgern als sehr wirksame Maßnahme zur Änderung des Strömungsfeldes erwiesen. Wie das Engine-Rig gezeigt

hat, bedarf insbesondere der Einsatz im Triebwerk einer besonders sorgfältigen Auslegung, die die Beachtung des Betriebsverhaltens erfordert. Die Versuche, die Konturierung einzuschränken, um das Schaufelblatt unverändert zu lassen (insbesondere keine Umstaffelung) waren dabei weniger erfolgreich.

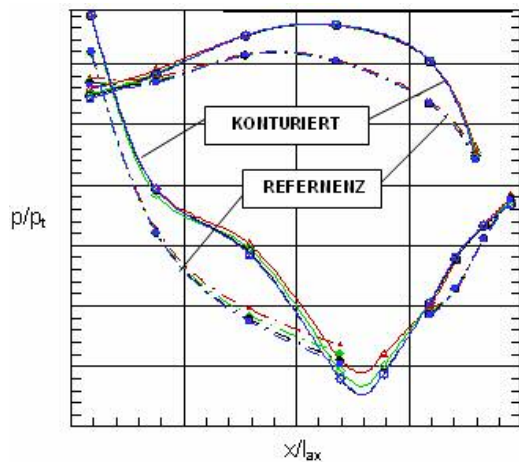


BILD 17. Profildruckverteilung an der Nabe des Eintrittsleitrades

Wegen der Komplexität der Randbedingungen und der Vielzahl an Einflussparameter war es nicht möglich, eine generische Kontur zu definieren. So haben gerade die beiden Aufbauten der LISA-Turbine aufgezeigt, wie wichtig die Integration der Ausrundungsradien in die geometrische Optimierung ist und dass die Folgegitter bei der Auslegung einbezogen werden müssen (vgl. [21-23]). Für den jeweiligen Anwendungsfall lässt sich aber eine typische Konturierung finden, die in der Lage ist, die Sekundärströmungsverluste effektiv zu reduzieren.

3.3. Bewertungskriterien

Abschließend soll noch kurz auf die Eignung verschiedener Kriterien zur Bewertung der Seitenwandkonturierung eingegangen werden. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurden bei den Auslegungen hauptsächlich drei Größen zur Beurteilung des Optimierungsergebnisses und zur Analyse der Versuche herangezogen. Neben dem Totaldruckverlust waren dies die Sekundäre Kinetische Energie (SKE) und der Druckgradient quer zur Hauptströmungsrichtung auf der Seitenwand.

Wegen der oben aufgezeigten Defizite in der numerischen Simulation und der daraus resultierenden Berechnung der Totaldruckverluste, wurde insbesondere die Reduzierung der SKE als ein guter Indikator für das strömungsphysikalische Verhalten und damit für die Eignung einer geometrischen Ausformung einer Seitenwandkontur herangezogen. Gerade im Hinblick auf Auswirkungen der Seitenwandkonturierung auf den Kernströmungsbereich kann aber dieses Kriterium keine ausreichende Zielgröße darstellen. Darüber hinaus wird mit zunehmender Komplexität des Strömungsfeldes die Definition der Sekundärströmung immer schwieriger (vgl. [17]).

Die Analyse erfolgreicher Profildruckverteilungen legt auch ein Kriterium nahe, dass die Druckdifferenz im Strömungskanal erfasst. Der Querdruckgradient im

vorderen Bereich des Strömungskanals ist hauptsächlich verantwortlich für die Anfachung der Sekundärströmung. Die Analysen haben aber auch hier gezeigt, dass dieses Kriterium zu unspezifisch ist, um eine zuverlässige Auslegung zu ermöglichen. Wie im Fall der SKE konnte keine gültige Korrelation gefunden werden. Das eigentliche Ziel der aerodynamischen Auslegung muss daher die globale Minimierung der Verluste im dreidimensionalen Strömungsraum sein, deren numerische Berechnung einer stetigen Verbesserung bedarf.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das vorliegende Paper zeigt einen Überblick der Technologieentwicklung bei MTU auf dem Gebiet der Seitenwandkonturierung. Dazu wurde zum einen ein neuer integrierter CAD-Auslegungsprozess entwickelt, zum anderen wurden Experimente durchgeführt, deren Komplexität vom Ringgitter über eine Versuchsturbine bis zum Engine-Rig stetig zunahm. Damit erfolgte eine systematische Analyse der strömungsphysikalischen Grundlagen und es gab die Möglichkeit zur Validierung der Auslegungswerkzeuge aufgrund der entstandenen Datenbasis.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Geometriegenerierung ausreichend flexibel ist, um eine numerische Optimierung durchführen zu können. Entscheidend für die erfolgreiche Optimierung sind neben der Zuverlässigkeit des Strömungslösers vor allem die geeignete Auswahl der Zielkriterien und die Zusammensetzung der Zielfunktion. Die durchgeführten Validierungen zeigen in den meisten Fällen eine zufriedenstellende Übereinstimmung von Messung und Berechnung, wobei Verbesserungen insbesondere der Transitionsmodellierung für die Verlustberechnung weitere Fortschritte erwarten lassen.

Wie schon oben beschrieben, haben sich die vorgestellten Untersuchungen zur Seitenwandkonturierung auf die Optimierung von Plattformen bestehender Schaufeln beschränkt. Ziel einer dreidimensionalen Gestaltung des Strömungskanals muss aber die Optimierung der gesamten benetzten Oberfläche sein. Neben der oben schon erwähnten Einbeziehung der Ausrundungsradien in die Optimierungsaufgabe wurde deshalb auch schon eine erste Kaskade untersucht, bei der das Schaufelblatt zusammen mit der Seitenwand optimiert wurde.

Dabei hat sich herausgestellt, dass ein iteratives Vorgehen bei der Auslegung einer Optimierung mit zu vielen Zielparametern überlegen ist. Darüber hinaus stellt die Abhängigkeit des Optimierungsergebnisses von der Parametrisierung der Geometrie, von dem Optimierungsalgorithmus und vor allem der Zielfunktion eine Aufgabe an die stetige Verbesserung der gesamten Optimierungsstrategie und ihrer Berechnungsgrundlage.

Die nächsten Schritte auf dem Weg der Seitenwandkonturierung müssen auch die Einbeziehung der Spaltströmungen zum Ziel haben. Die oben genannten Ergebnisse aus Rig und LISA-Turbine zum Einfluss der Leakageströmung müssen erweitert und die Geometrie der Kavitäten in der Plattformgestaltung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der zahlreichen Versuchen und insbesondere die Erkenntnisse aus dem 3-stufigen Turbinenrig haben aber bereits eine Basis gelegt, auf deren Grundlage es möglich ist, die Seitenwandkonturierung in neue Niederdruckturbinen einzubringen.

5. DANKSAGUNG

Die Autoren danken den Projektpartnern der ETH-Zürich (LSM), der Universität der Bundeswehr München (ISA) und den MTU-Kollegen, die alle zum Gelingen dieses Projektes wesentlich beigetragen haben. Darüber hinaus gilt der Dank dem BMWi, das dieses Projekt im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms Phase 3 gefördert hat. Schließlich gilt der Dank MTU Aero Engines für die Erlaubnis zur Veröffentlichung dieses Beitrags.

6. LITERATUR

[1] Dejc, M.E., Gubalev, A.B., Filippov, G.A., Wang, Z., 1962, "A new method of profiling the guide vane cascades of stages with small ratios of diameter length", *Teploenergetika* No. 8, 1962

[2] Pioske, C., Gallus, H.E., 1997, "Dreidimensionale Turbinenbeschaukelung", *Motortechnische Zeitschrift* 58 (1997) 6, S. 358-362, 1997

[3] Chen, N.X., Zhou, Q., Huang, W., 1996, "A study on axial skewing effect of a turbine stator by 3D Navier-Stokes analysis", ASME-paper, 96-GT-149, 1996.

[4] Pullan, G., Harvey, N.W., 2007, "The Influence of Sweep on Axial Flow Turbine Aerodynamics in the Endwa., Region", ASME-paper GT2007-27750

[5] Langston, L.S., Nice, M.L., and Hooper, R.M., 1976, "Three-Dimensional Flow Within a Turbine Cascade Passage," ASME Paper No. 76-GT-50

[6] Duden, A., Raab, I., & Fottner, L., 1998, "Controlling the Secondary Flow in A Turbine Cascade by 3D Airfoil Design and Endwall Contouring," ASME Paper 98-GT-72

[7] Gier, J., Ardey, S., Eymann, S., Reinmöller, U., Niehuis, R., 2002, "Improving 3D Flow Characteristics in a Multistage LP Turbine by means of Endwall Contouring and Airfoil Design Modification Part 2: Numerical Simulation and Analysis", ASME-Paper GT-2002-30353

[8] Sauer, H., Wolf, H., 1993, "Influencing the secondary flow in turbine cascades by the modification of the blade leading edge", 2nd European Conference on Turbomachinery, Antwerpen, 1997

[9] Rose, M.G., 1994, "Non-axisymmetric endwall profiling in the HP NGV of an axial flow gas turbine", ASME-paper GT1994-249.

[10] Pioske, C., 1999, "3D-Gestaltungskonzepte für Turbinenleiträder unter besonderer Berücksichtigung des Sekundärströmungsverhaltens", PhD thesis RWTH Aachen

[11] Harvey, N.W., Rose, M.G., Taylor, M.D., Shahpar, S., Hartland, J., Gregory-Smith, D.G., 2000, "Nonaxisymmetric Turbine End Wall Design: Part I Three-Dimensional Linear Design System," ASME J. of Turbomachinery, Vol.122, pp.278-285

[12] Rose, M.G., Harvey, N.W., Seaman, P., Newman, D.A. and McManus, D., 2001, "Improving the Efficiency of the Trent 500 HP Turbine Using Non-Axisymmetric End Walls: Part II Experimental Validation," ASME Paper No. 2001-GT-0505.

[13] Nagel, M.G. and Baier, R.D., 2003, "Experimentally Verified Numerical Optimization of a 3D-Parameterized Turbine Vane With Non-Axisymmetric End Walls," ASME Paper No. GT2003-38624.

[14] Ardey, S., Gier, J., 2001, "Randzonenbeeinflussung bei Schaufelzahlreduktion in Niederdruckturbinen", DGLR-2001-206.

[15] Praisner, T.J., Allen-Bradley, E., Knezevici, D.C., Sjolander, S.A., Grover, E.A., 2007, "Application of Non-Axisymmetric Endwall Contouring to Conventional and High-Lift Turbine Airfoils", ASME Paper GT2007-27579

[16] Gregory-Smith, D., Ingram, G., Stokes, M.R., 2008, "Profiled Endwalls combined with Blade Lean to Minimise Secondary Flow", ASME-Paper GT2008-50811.

[17] Germain T., Nagel M., Baier R.-D., 2007, "Visualisation and Quantification of Secondary Flows: Application to Turbine Bladings with 3D-Endwalls", Paper ISAIF8-0098, Proc. of the 8th Int. Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Lyon, July 2007

[18] Kasper, C., Rose, M.G., Staudacher, S. Gier, J., 2008, "A Study of Unsteady Secondary Flow in a Water Flow Axial Turbine Model", ASME-Paper GT2008-50239.

[19] Gier, J., Raab, I., Schröder, T., Hübner, N., Franke, M., Kennepohl, F., Lippl, F., Germain, T., Enghardt, L., 2007, "Preparation of Aero Thechnology for New Generation Aircraft Engine LP Turbines", CEAS-2007-139.

[20] Behr, T., Kalfas, A.I., Abhari, R.S., 2007, "Unsteady Flow Physics and Performance of a One-and-1/2-Stage Unshrouded High Work Turbine", ASME J. of Turbomachinery, 129 (ASME Paper No. GT2006-90959).

[21] Germain, T., Nagel, M., Raab, I., Schüpbach, P., Rose, M.G., Abhari, R.S., 2008, "Improving Efficiency of a High-Work Turbine Using Non-Axisymmetric Endwalls. Part I: Endwall Design and Performance", ASME-Paper GT2008-50469.

[22] Schüpbach, P., Rose, M.G., Abhari, R.S., Germain, T., Raab, I., Gier, J., 2008, "Improving Efficiency of a High-Work Turbine Using Non-Axisymmetric Endwalls. Part II: Time Resolved Flow Physics", ASME-Paper GT2008-50470.

[23] Schüpbach, P., Rose, M.G., Abhari, R.S., Germain, T., Raab, I., Gier, J., 2008, "Effects of Suction and Injection Purge-Flow on the Secondary Flow Structures of a High-Work Turbine", ASME-Paper GT2008-50471.

[24] Vera, M. de la Rosa Blanco, E. Hodson, H., Vazquez, R., 2007, "Endwall Boundary Layer Development in an Engine Representative Four-Stage Low Pressure Turbine Rig", ASME-paper, GT2007-27842