

Verluste komplexer Oberflächenstrukturen

Einfluss komplexer Oberflächenstrukturen auf das aerodynamische Verlustverhalten von Beschaukelungen

P. Gilge, F. Herbst, Nachwuchsgruppe Multiphysik turbulenter Strömungen, Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Leibniz Universität Hannover

Kurzgefasst

- Turbulente Grenzschichten
- Turbulenz-Modellierung
- Rauheiten
- Fehlanströmung
- Druckgradient

Komplexe Investitionsgüter haben für die Industrie und Volkswirtschaft Deutschlands eine hohe Relevanz. Sind es doch solche Investitionsgüter, bei denen Funktionalitäten aus einer großen Bandbreite ingenieurwissenschaftlicher Disziplinen zusammenwirken müssen, um das beabsichtigte technisch-wirtschaftliche Ergebnis zu erreichen, so dass eine hohe Wertschöpfung generiert wird. Während aber die Neuentwicklung dieser Güter und deren Komponenten seit jeher auf der Nutzung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und der Weiterentwicklung wissenschaftlicher Methoden basiert, ist die Regeneration (im Sinne von Wartung, Reparatur und Grunderneuerung) betriebsbeanspruchter komplexer Investitionsgüter auch heute noch überwiegend ein an eine Fachkraft geknüpfter erfahrungsbasierter Prozess. Der Sonderforschungsbereich 871 „Regeneration komplexer Investitionsgüter“ (SFB 871), in dem das hier beantragte Großprojekt angesiedelt ist, will fehlende wissenschaftliche Grundlagen dafür erarbeiten, dass komplexe Investitionsgüter künftig so wiederhergestellt werden, dass der Nutzen für den Anwender des Investitionsguts maximiert wird. Dazu wird der funktionale Nutzen regenerierter Komponenten und ganzer regenerierter Investitionsgüter bewertet.

Als gemeinsames Beispiel für ein solches komplexes Investitionsgut hat sich der SFB 871 schon zur Beantragung der 1. Förderperiode das Flugtriebwerk ausgewählt, spezifisch ein Turbofan-Triebwerk aus der zivilen Luftfahrt. Bei diesen Maschinen sind alle beteiligten ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen bis an die Grenzen der physikalischen Kenntnisse und der Auslegungsmethoden gefordert. Das Teilprojekt B3 des SFB 871, welches hier vorgestellt wird,

befasst sich mit dem aerodynamischen Einfluss komplexer betriebs- und regenerationsbedingter Oberflächenstrukturen auf die Umströmung von Verdichter- und Turbinenbeschaukelungen. Das TP B3 ermöglicht so die effiziente Bewertung, Auswahl und Durchführung von Regenerationspfaden hinsichtlich der Qualität der Schaufeloberflächen.

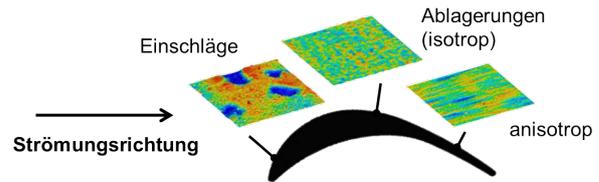


Abbildung 1: Gemessene betriebsbeanspruchte Oberflächen aus Turbine als Beispiele für typische Rauheitsstrukturen an den verschiedenen Positionen auf den Schaufeln

In den bisherigen Förderperioden (FP) 1 und 2 wurden für Turbinen und Verdichter charakteristische Oberflächenstrukturen gemessen und mittels zwei- und dreidimensionaler Parameter geometrisch charakterisiert. Es zeigten sich je nach Position im Gesamttriebwerk und auf der jeweiligen Schaufel unterschiedliche Rauheiten, die einen räumlich ungerichteten (isotropen) oder gerichteten (anisotropen) Charakter aufweisen. Entlang einer Schaufeloberfläche wurden darüber hinaus Kombinationen dieser Strukturen festgestellt (Abbildung 1).

In Windkanaluntersuchungen mit für diesen Zweck ausgelegten Turbinen- und Verdichterschaufeln wurde eine eindeutige Abhängigkeit des integralen Verlustverhaltens von der Rauheitsstruktur, deren Position bzw. dem dort vorherrschenden Druckgradienten und Grenzschichtzustand sowie den Kombinationen der Rauheiten festgestellt. Um die verantwortlichen physikalischen Vorgänge zu verstehen, wurden die integralen Untersuchungen um lokale Untersuchungen von Grenzschichten komplexer rauer Oberflächen ergänzt. Die mittels optischer Messtechniken und Direkten Numerischen Simulationen (DNS) gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Anisotropie der Rauheit einen signifikanten Einfluss auf die Grenzschicht hat (Abbildung 2) und daher die bisher übliche ausschließlich geometrische Charakterisierung mit einer skalaren äquivalenten Sandkornrauheit nicht ausreichend ist.

In der derzeit laufenden 3. Förderperiode des SFB 871 ist das zentrale wissenschaftliche Ziel die Bereitstellung einer RANS-basierten Turbulenz-Transitionsmodell-Kombination, die den quantitati-

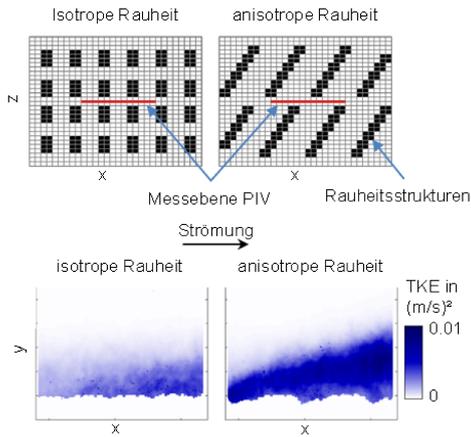


Abbildung 2: Vergleich zweier Oberflächenrauheiten mit gleicher äquivalenter Sandkornrauheit aber unterschiedlicher Ausrichtung der Oberflächenstrukturen (links) und die resultierende Verteilung der turbulenten kinetischen Energie TKE (rechts)

ven Einfluss dieser komplexen Rauheiten auf Strömungsgrenzschichten in relevanten Strömungsregimen mehrstufiger Triebwerksmodule vorhersagen kann. Damit ist es möglich, den Einfluss der Oberflächenrauheiten, wie sie nach dem Betrieb und der Regeneration von Turbinen- und Verdichterschaufeln vorliegen, auf die Leistung und den Wirkungsgrad des Gesamttriebwerks vorherzusagen.

Um dies vor dem Hintergrund eines virtuellen Regenerationspfads und der mehrstufigen Komponenten präzise und effizient zu erreichen, werden modellbasierte Beschreibungen (engl. reduced order models) für den lokalen Einfluss der Rauheiten auf die Strömungsgrenzschichten der Schaufeln auf Basis des Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Ansatzes entwickelt. Wie Ergebnisse der 1. und 2. FP sowie der Literatur zeigen, ist der quantitative Einfluss komplexer Rauheiten abhängig von vielfältigen aerodynamischen Randbedingungen und Effekten. So muss der Einfluss der komplexen Formen der Rauheiten in laminaren, transitionellen und turbulenten Grenzschichten modelliert werden. Insbesondere müssen die Effekte von Druckgradienten und Queranströmung anisotroper Rauheiten im Modell berücksichtigt werden [1].

Um den Einfluss komplexer Oberflächen auf den Zustand der Strömungsgrenzschicht zu bestimmen und damit das für die Modellentwicklung notwendige Verständnis wie auch quantitative Datenbasis zu schaffen grundlegende, werden DNS generischer Kanalströmungen mit der in FP 2 im TP B3 etablierten immersed boundary method (IBM) in OpenFOAM durchgeführt. Die IBM erlaubt die hochauflösende Abbildung der Effekte komplexer Rauheitsstrukturen in der Simulation, da auf eine rechenetz-basierte räumliche Diskretisierung der Rauheit bei gleichbleibender Ergebnisqualität (Ab-

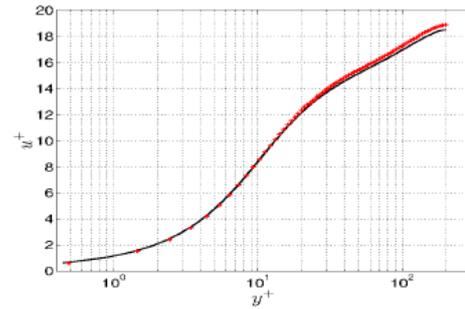


Abbildung 3: Zeitlich gemittelte wandnormale Verteilung der Geschwindigkeit über einer betriebsbeanspruchten Oberfläche einer IBM DNS (rot) und einer DNS mit netzbasierter räumlicher Oberflächendiskretisierung (schwarz)

bildung 3) verzichtet werden kann. Für die ausgewählten repräsentativen Oberflächenstrukturen werden die in den ersten beiden FPs bereits erfolgten Simulationen um weitere Variationen ergänzt. Ziel der Variationen ist es, den Parameterraum der rauheitswirksamen aerodynamischen Randbedingungen (z.B. Wandschubspannungsgeschwindigkeit, Clauser-Druckgradientparameter und Zuströmwinkel anisotroper Rauheiten) abzudecken, die für die Positionen der Rauheiten im Gesamttriebwerk (Komponente, Stufe, relative Sehnenlänge) und dessen Betriebspunkte charakteristisch sind.

Aus den räumlich und zeitlich hochaufgelösten Strömungsfeldern werden zum einen die Änderungen der Wandschubspannung gegenüber einer ideal glatten Oberfläche und zum anderen entsprechend eines durch den Antragssteller ausgearbeiteten Ansatzes RANS-Modellgrößen lokal berechnet, um als lokale dreidimensionale Soll-Größen für die Kalibrierung der Modelle zu dienen [2].

WWW

<http://www.tfd.uni-hannover.de>

Weitere Informationen

V. Koeplin, F. Herbst, J.R. Seume (2017): Correlation-Based Riblet Model for Turbomachinery Applications, ASME. J. Turbomach. 2017;139(7):071006-071006-10. doi:10.1115/1.4035605.

C. Müller-Schindewolffs, R.-D. Baier, J.R. Seume, F. Herbst (2017): Direct Numerical Simulation Based Analysis of RANS Predictions of a Low-Pressure Turbine Cascade, ASME. J. Turbomach. 2017;139(8):081006-081006-11. doi:10.1115/1.4035834