

DISS. ETH NO. 17813

Axial Turbine Rotor Aero-thermal Blade Tip Performance Improvement through Flow Control

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Bob MISCHO

Dipl.-Ing. TU Kaiserslautern
born 13.7.1977
citizen of Luxembourg

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. R. S. Abhari, examiner
Prof. Phillip M. Ligrani, co-examiner
Prof. Dr. A. Steinfeld, co-examiner

Zürich, 2008

Abstract

In the majority of axial high-pressure turbine designs, often shroudless, highly loaded rotor blades are used. Such designs are very attractive from an economical point of view in aero engines for example since the engine weight is reduced compared to heavier shrouded rotors with higher blade counts. Furthermore, higher turbine inlet temperatures are constantly aimed for to increase thermal efficiency and power output. However, in un-shrouded rotors, tip leakage, driven by the blade loading, occurs from pressure to suction side and generates about 1/3 of all the losses in an axial high-pressure turbine stage. In addition, the hot tip leakage imposes lifetime limiting heat load to the rotor blade tips. This work explores in a computational study flexible and efficient ways of active and passive flow control to increase aero-thermal blade tip performance of shroudless, highly loaded axial turbine rotor airfoils. In a first step highly accurate three-dimensional CFD tools have been developed in-house to perform the computational investigation. A major part of this development focused on efficient, robust and high quality numerical grid generation for axial turbomachinery application. In a second step two novel approaches in active and passive tip flow control were defined and the effect on aero-thermal blade tip performance was compared to the base line flat tip case without flow control. The active flow control configuration used coolant fluid injected from the casing to influence tip leakage aerodynamics of a flat blade tip in view of a tip leakage mass flow reduction. A set of injection conditions and hole arrangement resulting in an optimum tip leakage control were found. A flow model summarizing different interaction mechanisms between tip leakage and injection fluid was developed. The passive control focused on profiling of recess cavity walls. Based on the three-dimensional cavity flow occurring in a nominal recess design without profiling a new recess design with profiled cavity was developed. The new design reduced tip leakage mass flow and cavity heat transfer. At the same time the overall power output and thermal efficiency were increased. The numerical results were extensively validated by measured data gener-

ated in an experimental study on the same configurations investigated in the present work. The good agreement between computational and measured data shows that the suggested flow control alternatives are practical and applicable in both currently existing and future turbine designs.

Zusammenfassung

In heutigen Hochdruckturbinen werden mehrheitlich Rotoren ohne Deckband verwendet. Diese zeichnen sich durch einen hohen Arbeitsumsatz aus. Aus wirtschaftlicher Hinsicht sind diese Ausführungen vorteilhaft, da beispielsweise das Gewicht eines Flugzeugtriebwerks mit solchen Rotoren gegenüber denen mit Deckband an der Schaufelspitze, verringert werden kann. Weiterhin wird zwecks Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung nach immer höheren Turbineneintrittstemperaturen gestrebt. Jedoch bietet der Spalt zwischen Rotorschaufelspitze und Turbinengehäuse Raum für eine Ausgleichsströmung von der Druck- zur Saugseite. Diese sogenannte Schaufelspitzenströmung ist in mehreren Hinsichten unerwünscht. Zum einen wird ca. $1/3$ aller aerodynamischen Verlusten in einer Hochdruckturbinenstufe durch das Ausmischen des Schaufelspitzenwirbels hervorgerufen, welcher bei dem Wiedereintritt des Leakestroms in die Schaufelpassage entsteht. Des Weiteren ist dieser Leakestrom infolge seiner hohen Temperatur für eine starke thermische Beanspruchung der Schaufelspitzen verantwortlich, welche bei unzureichender Kühlung unter dieser thermischen Last versagen. Somit beeinflusst der Spaltstrom auch massgeblich die Lebensdauer der Rotorschaufeln. Die vorliegende Arbeit untersucht mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen (CFD) sowohl aktive als auch passive Massnahmen zur Kontrolle der Schaufelspitzenströmung mit dem Ziel den Wirkungsgrad und die Lebensdauer von Rotorschaufeln ohne Deckband zu erhöhen. In einem ersten Schritt wurden geeignete Strömungssimulationsprogramme zur Untersuchung der Schaufelspitzenströmung entwickelt. Dabei stand besonders die Generierung von numerischen Gittern im Vordergrund, welche robuste und genaue Strömungssimulationen innerhalb einer realistischen Zeit liefern konnten. In einem zweiten Schritt wurden zwei neuartige Konzepte zur Kontrolle der Schaufelspitzenströmung erarbeitet und deren Einfluss auf den Wirkungsgrad sowie die Wärmeleitung an der Schaufelspitze untersucht. Die sogenannte aktive Kontrolle bestand in der Eindüsung von Kühlluft aus dem Turbinengehäuse über den Rotorschaufeln. Ziel dieser Eindüsung war eine

Veränderung der Aerodynamik, welche zu einem verringerten Spaltstrom führen würde. Zu diesem Zwecke wurden verschiedene Eindüsungskonfigurationen untersucht. Schliesslich wurde mit Hilfe der optimalen Konfiguration ein Modell zur Erklärung der relevanten Strömungsmechanismen infolge der Eindüsung erstellt. Die passive Methode lieferte eine optimierte Schaufelspitzengeometrie. Dabei wurde die Geometrie einer aus der Schaufelspitze ausgehobenen Tasche mit Hilfe von dreidimensionaler Strömungsuntersuchung optimiert. Die Untersuchungen zeigten, dass der Rotor mit dieser Spitzengeometrie, den Spaltstrom und die Wärmeleitung in die Schaufelspitze, verringerte. Zudem wurden der Wirkungsgrad und die Leistungsabgabe erhöht. Die Simulationsergebnisse wurden weitreichend mit Hilfe von experimentellen Daten validiert. Die experimentell untersuchten Konfigurationen aus denen diese Daten hervorgingen, waren identisch mit den in dieser Arbeit numerisch untersuchten Konfigurationen. Die gute Übereinstimmung der numerischen Ergebnissen mit den Messdaten, bestätigt die Funktionsweise der vorgestellten Konzepte zur Verbesserung der Schaufelspitzenströmung und beweist, dass ihre praktische Anwendung in heutigen und zukünftigen Hochdruckturbinen möglich ist.