

Diss. ETH Nr. 15230

Evolution of Unsteady Secondary Flows in a Multistage Shrouded Axial Turbine

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
JOËL PIERRE SCHLIENGER
Dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 22. Juni 1971
in Thal (SG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Reza S. Abhari, Referent
Prof. Dr. T. Rösgen, Korreferent

Zürich 2003

ABSTRACT

This work presents the results of detailed unsteady flow measurements in a rotating two stage shrouded axial turbine. The turbine was built at the Laboratory of Turbomachinery at the ETH Zurich as part of this thesis. The design, the rig engineering and the manufacturing of the turbine was one significant task of this work. The resulting very precise facility is used to experimentally study the evolution and convection of the unsteady secondary flow field and its interaction with the blade rows in a real multistage environment.

The time-resolved flow field measurements in the second turbine stage are performed with highly sophisticated miniature fast response pressure probes and state-of-the-art pneumatic multi-hole probes for the steady flow field. The unique combination of this versatile research facility and the advanced measurement technology of fast response probes, makes the presented results very unique. Novel probe calibration models and probe designs are developed and validated in the turbine flow field. The engineering of highly automated data reduction systems (HERKULES) lead to a powerful software tool for the post-processing of the fast response pressure data within a few hours for a typical area traverse of several hundred grid points.

The interaction of the rotor indigenous vortices with the downstream blade rows are subject of significant loss generation due to the stretching of the vortices as they convect through the downstream blades. This highly unsteady process is measured in great detail at the exit plane of the first rotor. The unsteady flow field is classified into three time periods for one blade passing event. In the first period, the level of interaction between the vortices, the wakes and the downstream blades is moderate and the turbine losses are minimal. The second phase shows an interaction mechanism between the rotor vortical system and the rotor wake, as the vortices are pushed towards the rotor suction side due to the relative motion of the rotor and stator blades. The high loss fluid from the wake is rolled up into the passage vortex and increases loss at the rotor hub section. The turbine losses reach a maximum within the third period where the vortices are tilted and stretched in the streamwise direction. The associated increase of vorticity generates more shear and thus more loss. The measured mechanism is typical for unsteady flows and losses in this type of flow environment.

The results of the labyrinth seal variation highlights the importance of the reentry path of the leakage flow into the mainstream and indicates that the hub and tip labyrinth design ought to be considered from different perspectives.

The prediction of secondary flows and flow profiles is achieved by a novel flow model as shown in the thesis. The flow model is validated with experimental data wherein the results show excellent agreement with the measured data.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Resultate von zeitaufgelösten Messungen der instationären Strömungsfelder in einer zweistufigen Axialturbine mit Deckbandgeometrie. Die Auswertung und Analyse der Messungen konzentriert sich wesentlich auf die Interaktionsmechanismen zwischen der Leckage- und der Hauptströmung sowie auf die zeitabhängigen Sekundärströmungsfelder. Die dafür notwendige Versuchsanlage wurde am Labor für Strömungsmaschinen der ETH Zürich entworfen und aufgebaut. Die Auslegung der Anlage ist ein wichtiger Teil dieser Arbeit und daher im Detail beschrieben.

Die zeitaufgelösten Strömungsfelder der zweiten Turbinenstufe werden mittels schneller aerodynamischer Sondentechnik gemessen sowie mit pneumatischen Mehrlochsonden für das zeitgemittelte Strömungsfeld. Die ideale Kombination von schneller Sondenmesstechnik und hochpräziser Versuchsanlage führt zu neuen Messergebnissen und eröffnet dadurch neue Möglichkeiten für die experimentelle Untersuchung von instationären Strömungen in Turbomaschinen. Neue Sondenentwicklungen und Kalibrationsmodelle werden in dieser Arbeit beschrieben und validiert. Die durch die schnelle Sondenmesstechnik anfallenden enormen Datenmengen werden durch die Entwicklung von leistungsfähigen Programm-Routinen automatisch reduziert und ausgewertet. Die damit verbundene Datenstruktur sowie das Software-Konzept (HERKULES) ist in dieser Arbeit detailliert beschrieben.

Die Interaktion der Rotor relativen Sekundärwirbel mit den Vorderkanten der darauf folgenden Leiträder ist eine Ursache für den erhöhten Energieverlust im Schaufelgitter. Die Konvektion der Wirbel durch das Leitrad hindurch und dem damit verbundenen Strecken in Strömungsrichtung erhöht die Gitterverluste signifikant. Dieser instationäre Mechanismus wird mittels schneller Sondentechnik aufgelöst und quantifiziert. Der Interaktionsprozess lässt sich in drei Phasen pro Schaufelperiode aufteilen. Die erste Phase bezieht sich auf eine minimale Interaktion zwischen den Rotorwirbeln und der Leitradvorderkante. Die damit verbundenen Verlust erreichen dabei ein Minimum. In der zweiten Phase nähern sich die Wirbel der Leitradvorderkante und werden dadurch gegen die Rotorhinterkante gedrückt. Dabei interagiert der Passagenwirbel mit der Nachlaufdelle der Rotorhinterkante, was zu einem Abfallen der Totaldruckverteilung am Rotoraustritt führt. Aufgrund dieser Interaktion gelangt verlustbehaftetes Fluid aus der Nachlaufdelle in die Hauptströmung und verursacht den Totaldruckabfall. Die dritte Phase beschreibt eine intensive Interaktion zwischen Sekundärwirbel und Leitrad. Die Gitterverluste erreichen zu diesem Zeitpunkt ein Maximum. Die damit verbundene Erhöhung der Wirbelstärke wird analysiert und diskutiert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen lässt sich ein Strömungsmodell für die Interaktion von Wirbel und Nachlaufdelle so-

wie Wirbel und Schaufelprofil qualitativ beschreiben.

Der Einfluss der Labyrinth-Dichtgeometrie auf die Entwicklung von Sekundärströmungen an Nabe und Spitze ist ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt für die Verbesserung des Turbinenwirkungsgrades. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass die Labyrinth-Austrittsgeometrie entscheidend ist für die Entwicklung der Sekundärströmung stromabwärts.

Abschliessend wird ein stationäres 2D-Strömungsmodell für die Bestimmung der Strömungsprofile (z.B. Strömungswinkel) in der Rotoraustrittsebene präsentiert. Das Strömungsmodell wurde anhand der Messergebnisse verifiziert. Der Vergleich zeigt, dass die Resultate sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Die radialen Strömungsprofile lassen sich demnach aus dem vorgeschlagenen Strömungsmodell und diverser Auslegeparameter der Turbinenstufe sowie der Gittergeometrie herleiten.