

Diss. ETH Nr. 16605

Flow Structure and Stability of a Turbocharger Centrifugal Compressor

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

Matthias Wolfgang Schleer
Dipl.-Ing. RWTH Aachen
geboren am 09. Mai 1973
in Freiburg im Breisgau, Deutschland

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Reza S. Abhari, Referent
Prof. Dr. Seung Jin Song, Korreferent
Dr. Beat Ribi, Korreferent

Zürich 2006

Abstract

This compressor research project deals with the aerodynamic behavior and stability of small-scale highly loaded centrifugal compressors. These compressors are widely used in distributed power applications and in automotive turbocharging. In the course of this thesis the flow structure and the formation of the secondary flows have been experimentally investigated. The operating regime near the stall line at part speed operation is of special interest. Two facilities of different scales were developed and equipped with a similar compressor stage. The real-scale facility provides the baseline for the comparison of the system behavior. The use of the large-scale research facility provides the opportunity to measure accurately the structure of the flow in the diffuser. Optical velocimetry systems and time resolved pneumatic probes have been applied to a variety of diffuser configurations. For analyzing the stability of the compressor system the wall pressure fluctuations along the shroud and diffuser have been measured in a time resolved manner. Based on these time resolved pressure fluctuations post-processing methods have been developed to characterize flow instabilities shortly after their formation. They provide insight into the onset of instability and the role of the tip clearance flow on stall inception.

A special focus is put on the effects of low Reynolds numbers, high blade-loading, and large relative tip clearance on the flow structure. These effects are common features of compressors in small-scale applications and are responsible for the deterioration of compressor performance at small scales. In order to find dependencies of stability and performance upon the Reynolds number a parametric study is performed. Therefore, the compressor behaviour is measured at the same operational point but at modified inlet pressure. It is found that in the current machine the Reynolds number has little effect on the compressor performance.

To investigate tip clearance effects, flow velocity measurements have been performed at different diffuser and tip clearance configurations. Using this data the formation of the diffuser flow structure and its dependence on the flow through the tip gap is studied. The tip clearance width has a dominating effect on the formation of secondary flows in the diffuser. The flow structure in this highly loaded compressor does not comply with the classical Jet-Wake pattern. For increased clearance, the clearance flow is identified as an additional highly vortical feature. This additional pattern near the shroud destabilizes the compressor and deteriorates the performance. Based on these findings, a

modified flow model which includes tip leakage is proposed. This 3-zone flow model is more appropriate for the description of small-scale compressors with large relative tip clearance.

Kurzfassung

Dieses Forschungsvorhaben widmet sich dem aerodynamischen Verhalten und der Stabilität von kleinen, stark belasteten Radialverdichtern. Derartige Radialverdichter werden heute in grossen Stückzahlen in dezentralen Systemen zur Stromerzeugung und in automobilen Turboladern eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Strömungsstrukturen und die Interaktionen der verschiedenen Strömungsphänomene experimentell untersucht. Von besonderem Interesse sind hierbei Betriebsbereiche nahe der Stabilitätsgrenze des Verdichters.

Um Messungen an geometrisch kleinen Anlagen zu ermöglichen, wurden zwei Versuchsanlagen verschiedener Grösse entwickelt und mit geometrisch ähnlichen Verdichterrädern ausgestattet. Die Anlage in Echtgrösse liefert die Basis für den Vergleich der beiden Anlagen während die geometrisch skalierte Anlage akkurate, zeitlich und räumlich aufgelöste Messungen ermöglicht. Das Stabilitätsverhalten des Kompressors wurde mittels zeitauflösenden Wanddrucksensoren untersucht. Im Weiteren wurden Analysetechniken entwickelt, um Instabilitäten frühzeitig zu erkennen und die Rolle der Strömung über die Schaufelspitzen zu erklären.

In geometrisch kleinen Verdichtern liegen vergleichsweise niedrige Reynolds Zahlen, hohe Schaufelbelastungen und grosse relative Spitzenspiele vor. Diese Parameter haben einen dominierenden Einfluss auf die Strömungsstruktur und wurden daher in dieser Arbeit speziell untersucht. Detaillierte zeitlich aufgelöste Messungen wurden bei vier verschiedenen Diffusor- und Spitzenspielkonfigurationen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnte gezeigt werden, dass die Spitzenweite einen dominierenden Einfluss auf den Druckaufbau im Laufrad und die Stabilitätsgrenze hat. Die Strömungsstruktur in der untersuchten Maschine entspricht nicht dem klassischen Jet-Wake Verhalten. Unter dem Einfluss der Spaltströmung bildet sich eine dritte hochturbulente Zone. Diese Strömungszone delokalisiert die bekannte Passagenströmung und destabilisiert den Verdichter. In dieser Arbeit wird ein modifiziertes Strömungsmodell vorgeschlagen, das dieser Struktur Rechnung trägt und für die Beschreibung geometrisch kleiner Radialverdichter besser geeignet ist.