

Diss. ETH No. 20670

**Experimental Investigation and Validation
of High Cycle Fatigue Design Systems
for Centrifugal Compressors**

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

ARMIN ZEMP

MSc ETH ME

born 27 March 1979

citizen of Doppleschwand, Lucerne, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reza S. Abhari, Examiner

Prof. Dr. Michael Casey, Co-Examiner

2012

Abstract

Centrifugal compressors are used in a wide range of applications. In the past, research in the field of centrifugal compressors focused on aerodynamic aspects with the goal to increase efficiency, pressure ratio and mass flow. The permanent improvement of the aerodynamic performance pushes modern designs of centrifugal compressors towards their mechanical limits. The maximum rotational speeds and the mass flow rates have been increased resulting in higher static mean stresses for the centrifugal impeller. Therefore, centrifugal compressor blades become more and more vulnerable to alternating blade stresses and suffer from high cycle fatigue failures.

Vibration of turbomachinery components is an undesirable but also an inevitable mechanical phenomenon limiting the component life time. Vibration is caused by mechanical excitation or by unsteady fluid-structure interactions. Research in the field of component vibration therefore means advance understanding of excitation and damping mechanisms. The reliable prediction of the vibratory response of a mechanical structure during the design phase is essential to guarantee the mechanical integrity of each of the components. Correct assessment necessitates the quantification of the forcing function and the associated damping properties under engine representative operating conditions. A proper predictability during the design phase would allow the total development costs to be reduced significantly. However, the experimental investigation and validation of high cycle fatigue design systems for centrifugal compressors is challenging due to the lack of representative experimental data.

Therefore, the goal of this work was to design and integrate application-relevant and engine representative impeller forced response scenarios into an existing high-speed centrifugal compressor test rig at the Laboratory for Energy Conversion at ETH Zurich. Experiments using in-house developed experimental techniques in a controlled environment allowed the blade forced response to be quantified under resonant conditions and the blade damping properties to be estimated based on experimentally determined resonant response characteristics. Experimental work was complemented by numerical research aiming to detail the unsteady 3D flow field within the centrifugal compressor stage as well as to model the centrifugal impeller blade dynamics using finite element modeling techniques.

The integration of a variable inlet guide vane row resulted in an impeller blade forcing caused by the low momentum vane wakes propagating downstream along the blade surfaces. Structural response levels were found to primarily depend on the amount of flow non-uniformity introduced into the inlet flow field by the vanes in zones of high mode-dependent structural excitability of the impeller blades. The blade aerodynamic damping

properties were mainly affected by the dynamic head of the impeller inlet flow field. Unsteady blade pressure distributions caused by the inlet guide vanes could be captured by blade mounted fast response pressure transducers and were used to quantify the blade forcing. Numerical predictions of unsteady blade pressure distributions in combination with experimentally estimated blade damping properties were used as an input for decoupled forced response FEM calculations in the frequency domain. The numerical predictions did not match the measured alternating blade stress levels during resonance and therefore additional effort is necessary to achieve a reliable prediction.

Experimental and numerical investigations of the impeller-diffuser interactions in a high-speed centrifugal compressor were performed to detail the influence of the radial gap between impeller exit and diffuser vane leading edges on the impeller blade vibratory response levels. Generally, a smaller radial gap size resulted in stronger diffuser vane potential field interactions with the rotating impeller blade trailing edges. However, an increase in radial gap size changed the impeller-diffuser interaction mechanism from a potential field interaction to an interaction of the impeller trailing edges with a circumferential flow field non-uniformity in the vane-less gap. An integrated design approach therefore is recommended to balance the aerodynamic performance of the compression stage with the blade forcing amplitudes. Decoupled forced response calculations in the time domain using finite element modeling techniques predicted the alternating blade stress levels sufficiently well but due to the required amount of computational power using the presented approach as a standard procedure during the design phase is questionable.

Blade forced response levels caused by a non-uniform injection flow field from an inducer casing bleed system were found to increase for higher bleed mass flow rates. For high injection mass flow rates blade forcing was found to be caused by the interaction of low momentum wake zones created by struts within the bleed flow channel convecting into the compressor flow field. For low injection mass flow rates the blade forcing was caused by the interaction of the tip leakage vortical structure interacting with the bleed channel struts. Blade damping properties for the specific case investigated were not significantly affected by the bleed mass flow rate.

Kurzfassung

Radialkompressoren werden für eine Vielzahl an industriellen Anwendungen genutzt. In der Vergangenheit hat sich die Forschung im Bereich der Radialkompressoren auf aerodynamische Aspekte konzentriert, um sowohl den Wirkungsgrad, das Druckverhältnis als auch den Massendurchsatz zu optimieren. Die permanente Weiterentwicklung der aerodynamischen Performance bringt moderne Designs an ihre mechanischen Grenzen. Sowohl die Erhöhung der maximalen Drehzahlen, als auch die Massendurchsätze führt zu erhöhten Mittelspannungen im Kompressor-Laufrad. Aus diesem Grund werden die Beschaukelungen von Radialkompressoren anfälliger im Bezug auf Wechselspannungsamplituden und versagen deshalb vermehrt auf Grund von Schwingungsrissbildungen.

Vibrationen in Turbomaschinen-Komponenten sind ein unerwünschtes aber auch ein unvermeidbares Phänomen, welches die Komponenten-Lebensdauer limitiert. Vibrationen werden durch mechanische Erregungen oder aber durch instationäre Fluid-Struktur Interaktionen hervorgerufen. Forschungsaktivitäten in diesem Bereich haben deshalb das Ziel die Grundlagen bezüglich Erregungs- und Dämpfungsmechanismen zu erarbeiten oder auszubauen. Eine zuverlässige Prädiktion der zu erwartenden Wechselspannungsamplituden mechanischer Komponenten, verursacht durch Resonanzschwingungen, bereits in der Entwicklungsphase, ist notwendig um die mechanische Integrität der Komponenten garantieren zu können. Für eine korrekte Abschätzung ist die Quantifizierung der Erregerfunktion und der Dämpfungseigenschaften unter anwendungsrelevanten Einsatzbedingungen zwingend erforderlich. Die exakte Vorhersagbarkeit der zu erwartenden Wechselspannungsamplituden würde es erlauben die Entwicklungskosten neuer Komponenten signifikant zu reduzieren. Jedoch sind experimentelle Untersuchungen und die Validierung von Entwicklungswerzeugen zur Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit eine grosse Herausforderung nicht zuletzt auf Grund fehlender repräsentativer experimenteller Daten.

Aus diesem Grund war das Ziel der hier vorliegenden Arbeit die Integration anwendungsrelevanter und repräsentativer Szenarien für erzwungene Schaufelschwingungen in einen existierenden, rasch laufenden Radialkompressor am Laboratory for Energy Konversion an der ETH in Zürich. Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von intern entwickelter Messtechnik unter kontrollierten Betriebsbedingungen des Kompressor-Pfufstandes erlaubten sowohl die Quantifizierung der erzwungenen Schaufelschwingungsamplituden in Resonanz als auch die Bestimmung der Dämpfungseigenschaften basierend auf den Resonanz-Charakteristiken. Die experimentellen Untersuchungen wurden ergänzt durch numerische Untersuchungen, um sowohl die dreidimensionalen, zeitabhängigen Strömungsfelder in der Verdichterstufe basieren auf CFD Berechnungen, als auch die Schaufeldynamik basierend auf finiter Elemente Methoden im Detail zu studieren.

Die Integration einer variablen Leitschaufelreihe führte zu erzwungenen Schaufelschwingungen, verursacht durch die Interaktion der stromabwärts laufenden Nachlaufströmungen der Leitschaufeln mit der Laufradbeschaufelung. Es konnte gezeigt werden, dass die Amplituden der erzwungenen Schaufelschwingungen primär vom Grad der Ungleichmässigkeit der Laufrad Anströmung abhängen, speziell in Schaufelregionen welche eine hohe relevante moden-spezifische Erregbarkeit zeigen. Schaufeldämpfungs-Eigenschaften wurden hauptsächlich durch den dynamischen Druck der Kompressor-Eintrittsströmung beeinflusst.

Instationäre Druckfelder auf den rotierenden Laufradschaufeln, erzeugt durch die stromaufwärts liegende Leitreihe, konnten mit rasch ansprechenden Drucksensoren, welche auf den Schaufeloberflächen angebracht wurden, aufgelöst werden und wurden zur Quantifizierung der Anregungsamplitude verwendet. Numerische Berechnungen der instationären Schaufeldrücke in Kombination mit den in den Experimenten ermittelten Dämpfungseigenschaften wurden als Input für ein entkoppeltes Finite Elemente Modell verwendet. Die Berechnung der Schaufelschwingungsamplituden wurde im Frequenzbereich durchgeführt. Die Übereinstimmung der Berechnung mit der im Experiment gemessenen Amplituden der Resonanzschwingungen war nicht genau genug und deshalb müssen zusätzliche Bemühungen unternommen werden, um die Vorhersage-Genauigkeit auf ein brauchbares Mass zu erhöhen.

Experimentelle und numerische Untersuchungen der Wechselwirkung zwischen Laufrad und Diffusor-Beschaufelung in einem rasch laufenden Radialkompressor Prüfstand wurden unternommen um den Einfluss der Grösse des radialen Spaltes zwischen Laufradaustritt und dem Eintritt in die Diffusorbeschaufelung im Detail zu studieren. Generell führen kleine Spaltmasse zu erhöhten Potenzialfeld-Interaktionen zwischen Laufrad und Diffusorbeschaufelung. Allerdings kann eine Vergrösserung des Spaltes zu einer Änderung des Interaktionsmechanismus führen. Anstelle einer Potentialfeldinteraktion führen grosse Spaltmasse zu einer inhomogenen Spaltströmung in Umfangsrichtung, welche dann die Wechselwirkung zwischen Laufrad und Diffusorbeschaufelung dominieren. Es wird deshalb ein integrierter Entwicklungsansatz vorgeschlagen, um beides, die aerodynamische Performance der Verdichterstufe, als auch die Anregungsamplituden auf den Laufradschaufeln während des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen. Entkoppelte Berechnungen der Schwingungsamplituden mit Hilfe Finiter Elemente Methoden wurden im Zeitbereich durchgeführt und haben mit einer hohen Zuverlässigkeit die zu erwartenden Schwingungsamplituden prognostiziert. Jedoch ist der präsentierte Ansatz äusserst Zeit- und Ressourcenintensiv und die Anwendbarkeit jener Methode als Standardverfahren während des Entwicklungsprozesses deshalb fraglich.

Erzwungene Schaufelschwingungen, hervorgerufen durch eine inhomogene Eindüsung eines Stabilisator-Systems, wurden stärker für höhere Eindüs-Massenströme. Es konnte gezeigt werden, dass für hohe Eindüs-Massenströme die Nachlaufströmungen der Streben im Eindüskanal mit den rotierenden Laufradschaufeln interagieren und deshalb Schaufelschwingungen hervorgerufen werden. Für sehr kleine Eindüs-Massenströme wurden die Schaufelschwingungen durch die Wechselwirkung des Spaltströmungswirbels an der Schaufelspitze mit den Streben im Eindüssystem hervorgerufen. Die Schaufeldämpfungseigenschaften wurden für den hier untersuchten Fall nicht signifikant beeinflusst durch den Eindüs-Massenstrom.