
Zum Einfluss des Spaltwirbels auf das aeroelastische Verhalten transsonischer Verdichter

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sebastian Leichtfuß

aus Wiesbaden Dotzheim

Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer
Mitberichterstatter : Prof. Dr. rer. nat. M. Schäfer
Tag der Einreichung : 14.10.2014
Tag der mündlichen Prüfung : 17.12.2014

Darmstadt 2015
D17



Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 1

Sebastian Leichtfuß

**Zum Einfluss des Spaltwirbels auf das aeroelastische
Verhalten transsonischer Verdichter**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3573-5

ISSN 2364-4761

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Reihe Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe gibt die Forschungs- und Entwicklungsfortschritte im Bereich der Turbomaschine an der Technischen Universität Darmstadt wieder. Aufgrund der starken Anwendungsorientierung in diesem Bereich der Forschung sind universitäre Fragestellungen Spiegelbild industrieller Entwicklungstrends.

Wechselnde politische, ökonomische und ökologische Rahmenbedingungen bestimmen hierbei aktuelle Entwicklungsschwerpunkte und bringen die Turbomaschine immer wieder an den Rand des technisch realisierbaren. Dadurch werden neue Erkenntnisse aus der Forschung nicht selten unmittelbar industriell umgesetzt.

In diesem Umfeld entstehen die industrie- und anwendungsnahen, wissenschaftlichen Arbeiten dieser Reihe. Sie beschreiben aktuelle Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen und numerischen Simulationen, die am Fachgebiet für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe an der Technischen Universität Darmstadt gewonnen werden konnten.

Heinz-Peter Schiffer

Darmstadt, 2015

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit ist Ergebnis meiner Tätigkeit am Fachgebiet für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe an der Technischen Universität Darmstadt. Sie wurde im Rahmen des Graduiertenkollegs “Instationäre Systemmodellierung von Flugtriebwerken“ durch die Deutsche Forschungsgesellschaft finanziert und entstand unter Kooperation mit dem Industriepartner Rolls-Royce Deutschland, wofür ich hier danken möchte.

Für die schöne Zeit am Fachgebiet, die Betreuung meiner Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer. Ebenfalls gilt mein Dank Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer für die Übernahme des Koreferates.

Die konstruktive und sehr freundschaftliche Atmosphäre am Fachgebiet habe ich sehr genossen. Hierfür danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern des Fachgebietes. Die Zeit am Fachgebiet war für mich sehr prägend und wird unvergessen bleiben.

Der größte Dank gilt meiner Familie und insbesondere meiner Frau Verena die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Sebastian Leichtfuß

Darmstadt, 2015

Übersicht

Zum Einfluss des Spaltwirbels auf das aeroelastische Verhalten transsonischer Verdichter

In der Verdichterentwicklung führen aerodynamisch hoch belastete Schaufelprofile in Kombination mit einer schlanken, integralen Bauformen dazu, dass die Gefahr von strömungsinduzierten Vibrationen bei Neuentwicklungen stetig steigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Rotorspaltströmung auf dieses Phänomen numerisch untersucht. Hierfür werden numerische Simulationen mit Hilfe eines linearisierten Verfahrens zur Berechnung der aeroelastischen Anfachung von Turbomaschinenschaufeln durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit experimentell ermittelten Daten abgeglichen, wobei sich eine gute Übereinstimmung ergibt. Durch Variationsrechnungen kann ein starker Einfluss von Schaufeleigenfrequenz und Rotorspaltströmung nachgewiesen werden. Analytische Betrachtungen zeigen, dass vorauseilende Schaufeln erheblichen Einfluss auf die aeroelastische Wechselwirkung an der Einzelschaufel haben. Diese Untersuchungen zeigen, dass auch weit entfernte Schaufeln einen Einfluss über die Spaltströmung ausüben. Durch eine konstruktive Beeinflussung dieser Spaltströmung im Gehäusebereich ist es möglich, Einfluss auf das aerodynamische und aeroelastische Verhalten der Verdichterstufe auszuüben.

Abstract

Influence of tip leakage flow on the aeroelastic behaviour of transonic compressors

The trend of higher aerodynamic loading in combination with thin and integral blade design lead to increasing risk of flow induced vibrations in the design process of new compressors. Within this thesis the influence of tip leakage flow on this phenomenon is numerically investigated. Simulations are carried out using a linearisation technique developed for the aeroelastic behavior of turbo machine blades. A comparison of numerical results to experimental data demonstrates a good agreement. A numerical variation study verifies the strong influence of blade eigenfrequency and rotor tip leakage flow on the aeroelastic behaviour of the compressor rotor. Analytical investigations prove a strong interaction of neighboring blades. Even blades far away show a distinct influence. Finally a rotor casing design is investigated to manipulate tip leakage flow and thus the aerodynamic and aeroelastic behavior of the compressor.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Strukturmechanik	6
2.2	Aerodynamik	22
2.3	Aeroelastik	31
2.4	Numerische Simulation	39
3	Testfälle	47
3.1	Prüfstand	48
3.2	Verdichterkonfigurationen	49
3.3	Messtechnik	50
3.4	Numerisches Setup	52
4	Ergebnisse	57
4.1	Vergleich: Experiment - Simulation	58
4.2	Analyse der numerischen Ergebnisse	69
4.3	Einfluss der reduzierten Frequenz	74
4.4	Interpretation der Ergebnisse	76
4.5	Schaufelinteraktion im Rotor	78
4.6	Konstruktive Gegenmaßnahmen	85
5	Fazit	87
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	87
5.2	Schlussfolgerungen	88
5.3	Ausblick	89
	Nomenklatur	91
	Abbildungsverzeichnis	96
	Literaturverzeichnis	96