





---

# **Aerodynamische Stabilisierung transsonischer Axialverdichter**

## Eine experimentelle Untersuchung der Blattspitzenströmung unter dem Einfluss von Gehäusestrukturierungen

---

**Aerodynamic Stability Enhancement of Transonic Axial Compressors:  
Experimental Investigation of the Blade Tip Flow with Casing Treatments**

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christoph Brandstetter aus Wetzlar  
Fachbereich Maschinenbau  
Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe  
Tag der Einreichung: 21. April 2015  
Tag der mündlichen Prüfung: 8. Juli 2015

Darmstadt 2016  
D17



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,  
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 4

**Christoph Brandstetter**

**Aerodynamische Stabilisierung  
transsonischer Axialverdichter**

Eine experimentelle Untersuchung der Blattspitzenströmung  
unter dem Einfluss von Gehäusestrukturierungen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4463-8

ISSN 2364-4761

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Christoph Brandstetter  
Darmstadt, 14.4.2016



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Für das Vertrauen, die fachlichen Anregungen und die gestalterischen Freiheiten möchte ich Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer herzlich danken.

Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Andreas Dreizler, der freundlicherweise das Korreferat der Arbeit übernommen hat. Sein kritischer Blick auf alle messtechnischen Fragestellungen war von großer Hilfe.

Die Erstellung der Arbeit wäre ohne die Mithilfe meines gesamten Fachgebiets, insbesondere der Verdichtergruppe in wachsender Besetzung nicht möglich gewesen. Auch die Arbeit einer Vielzahl von Studenten und hilfswissenschaftlichen Mitarbeiter soll an dieser Stelle erwähnt werden.

Mein besonderer Dank gilt Martin Kegalj, dessen Beitrag zu den optischen Messungen und der Verfassung der Publikationen nicht zu unterschätzen ist.

Die technische Realisierung der Messaufbauten wurde durch die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit der Verdichterabteilung von Rolls-Royce Deutschland ermöglicht. Hier möchte ich Frank Heinichen für die langjährige Unterstützung hervorheben.

Für das fachliche Verständnis der komplexen aerodynamischen Zusammenhänge war der Austausch mit anderen Forschungsinstituten unverzichtbar. Ich danke daher Sina Stapelfeldt vom Imperial College in London sowie Anton Streit von der TU München für die ausführlichen Diskussionen und die numerische Unterstützung.

Größter Dank gilt jedoch meiner ganzen Familie, die mir immer Rückhalt und Unterstützung gewährt hat.

Während meiner Jugend wurde mir ermöglicht, handwerkliche Grundlagen zu erlernen, die bei den experimentellen sehr hilfreich waren.

Meine Frau Nina und meine Kinder Anna und Philipp mussten während der turbulenten Zeit viele Einschränkungen ertragen und haben mir dennoch die Kraft gegeben, die Arbeit zu vollenden.



# Kurzfassung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Einflussnahme auf das aerodynamische Verhalten eines Verdichterrotors durch passive Strukturen in der Gehäusewand.

Die Möglichkeit, den Arbeitsbereich eines Verdichters durch Gehäusestrukturierungen gezielt zu erweitern, ist seit vielen Jahrzehnten bekannt. Vielfältige Arbeiten aus dem vergangenen Jahrzehnt legen nahe, dass es möglich ist, eine Erweiterung des Verdichterarbeitsbereichs bei gleichzeitiger Erhaltung des Wirkungsgrades zu erreichen. Dennoch konnte sich diese Methode im zivilen Flugtriebwerksbau bislang nicht durchsetzen, wodurch mögliches Optimierungspotential ungenutzt bleibt. Dieser Umstand ist unter anderem auf unzureichende Kenntnisse über die strömungsmechanische Auswirkung der Strukturen zurückzuführen.

In der vorliegenden Arbeit werden vielversprechende Vertreter von Gehäusestrukturierungen experimentell untersucht, um das grundlegende Verständnis der Wirkungsweise zu erweitern. Durch verschiedene instationäre Messverfahren werden Strömungsmuster im kritischen Rotorbereich aufgelöst.

Die Messungen wurden am transsonischen Verdichterprüfstand des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Als Versuchsträger dient eine Verdichterstufe mit Vorleitrad, die repräsentativ für eine Frontstufe eines modernen Hochdruckverdichters ist.

Als Grundlage der Untersuchung wird das aerodynamische Verhalten dieser Referenzkonfiguration detailliert untersucht, wobei der Fokus auf Strömungsstrukturen im Blattspitzenbereich liegt. Insbesondere in der Nähe der aerodynamischen Betriebsgrenze wird die Entwicklung von stabilitätskritischen Wirbelsystemen analysiert.

Im Rahmen der Arbeit kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz umfangsdiskreter Gehäusestrukturierungen, die Fluid aus dem stromab liegenden Teil des Rotors entnehmen und stromauf injizieren, signifikanter Einfluss auf die Wirbelsysteme im Blattspitzenbereich genommen wird. Der stabilitätsfördernde Mechanismus kann auf diesem Wege explizit aufgelöst werden. Zudem wird ersichtlich, dass verschiedene Gestaltungsformen von Gehäusestrukturen eine vergleichbare globale Auswirkung auf die Verdichterstufe bewirken, diese jedoch auf unterschiedlichen Wirkprinzipien

beruht. Die vorliegende Datenbasis erlaubt die Interpretation der jeweiligen Mechanismen, wodurch zukünftige Gestaltungen gezielter ausgelegt werden können.

Weiterhin wird das letztendliche aerodynamische Versagensverhalten der Konfigurationen mit und ohne Gehäusestrukturierung durch zeitaufgelöste Messverfahren analysiert. Die Ergebnisse zeigen für eine untersuchte Konfiguration ein Resonanzverhalten in der Nähe der Stabilitätsgrenze, das unter Umständen mechanisch kritische Schwingungen verursacht. Dass dieses Verhalten bisher nicht in numerischen Simulationen abgebildet werden kann, bekräftigt die Relevanz der experimentellen Untersuchung.

Auf Basis der vorgestellten Messdaten können zukünftige Simulationen qualitativ und quantitativ bewertet werden, um die Entwicklung ganzheitlich optimierter Verdichterstufen zu ermöglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1. Hochbelastete Verdichter . . . . .	6
2.1.1. Verdichterkennfeld und Stallgrenze . . . . .	9
2.1.2. Globale Instabilität und Verdichterpumpen . . . . .	11
2.1.3. Integration eines Vorleitrads . . . . .	13
2.2. Strömungsmechanische Grundlagen . . . . .	14
2.2.1. Wand und Profilgrenzschichten . . . . .	14
2.2.2. Verdichtungsstöße . . . . .	16
2.2.3. Stoßsysteme in Verdichtergittern . . . . .	18
2.2.4. Sekundärströmungen im Verdichterrotor . . . . .	21
2.3. Aerodynamische Betriebsgrenze des Verdichters . . . . .	22
2.3.1. Rotierender Strömungsabriss . . . . .	22
2.3.2. Spitzenkritische Rotoren . . . . .	23
2.4. Maßnahmen zur aerodynamischen Stabilisierung . . . . .	27
2.4.1. Rotorschaukel Pfeilung . . . . .	27
2.4.2. Gehäusestrukturen über dem Rotor . . . . .	28
2.5. Messaufgabe und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	34
<b>3. Versuchsträger und Methoden zur Auswertung</b>	<b>36</b>
3.1. Verdichterstufe . . . . .	36
3.1.1. Siebe in Zulaufkanal . . . . .	38
3.1.2. Stationäre Instrumentierung und Kennfeldvermessung . . . . .	39
3.1.3. Traversierbare Sonden . . . . .	41
3.1.4. Rotorschwingungsmesstechnik . . . . .	42
3.1.5. Instationäre Wanddruckmessung als Methode zur Stoßlagenbestimmung . . . . .	43
3.1.6. Gehäusestrukturen . . . . .	44
3.2. Geschwindigkeitsmessung durch Particle Image Velocimetry . . . . .	47
3.2.1. Rohdatenaufnahme . . . . .	48
3.2.2. Auswertung . . . . .	54
3.3. Zusammenfassung der Messbereiche . . . . .	63
3.4. Numerische Simulationen der Verdichterstufe . . . . .	64

<b>4. Untersuchung der Referenzkonfiguration</b>	<b>66</b>
4.1. Stationäre Stufenvermessung	66
4.1.1. Eintrittsbedingungen	66
4.1.2. Austrittsbedingungen und Stufenkennlinien	67
4.2. Untersuchungen im Rotorsystem	69
4.2.1. Vermessung von stationären Rotoraustrittsprofilen	69
4.2.2. Wanddruckvermessung zur Stoßlagenbestimmung an stationären Betriebspunkten	70
4.2.3. <i>PIV</i> Messungen in der Referenzkonfiguration	73
4.2.4. Instationäre Totaldruckmessungen in der Rotorabströmung	76
4.3. Untersuchung der Referenzkonfiguration an transienten Betriebspunkten nahe der Betriebsgrenze	79
4.3.1. Transiente Wanddruckvermessung	79
4.3.2. Transiente <i>Stereo-PIV</i> Vermessung	82
<b>5. Untersuchung der Gehäusestrukturen</b>	<b>89</b>
5.1. Stationäre Stufenvermessung	89
5.1.1. Sensitivität der Spitzeninjektion	90
5.2. Untersuchungen im Rotorsystem	91
5.2.1. Vermessung der stationären Rotorabströmung	91
5.2.2. Wanddruckvermessung zur Stoßlagenbestimmung an stationären Betriebspunkten mit Gehäusestruktur	96
5.2.3. Phasengemittelte <i>PIV</i> Messungen in den Gehäusestrukturen	101
5.2.4. Gehäusestruktur-periodisches Betriebsverhalten der Axialnutkonfiguration <i>AS</i>	103
5.2.5. Hitzdrahtmessungen in Axialnutkavität	108
5.2.6. Instationäre Totaldruckmessungen in der Rotorabströmung mit Gehäusestrukturen	111
5.2.7. Vergleich mit Numerischer Simulation	114
5.3. Transientes Betriebsverhalten an der Stabilitätsgrenze	116
5.3.1. Versagen der Spitzeninjektionskonfiguration	116
5.3.2. Versagen der Axialnutkonfiguration	118
<b>6. Vergleichende Ergebnisdiskussion</b>	<b>125</b>
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>146</b>
A.1. Grundlagen	146
A.1.1. Grenzschichten	146
A.1.2. Sekundärströmungen	148
A.1.3. Stabilitätsgrenze	149
A.2. Versuchsträger und Methoden	150
A.2.1. Rotoren	150
A.2.2. Sonden	151

A.2.3. Hitzdrahtmessung in Kavität . . . . .	154
A.2.4. Particle Image Velocimetry . . . . .	156
A.2.5. Numerische Simulation . . . . .	163
A.3. Bestimmung der Referenzgrößen . . . . .	163
A.4. Vergleich der Spitzeninjektionskonfigurationen . . . . .	166
A.5. Ergänzende Daten . . . . .	170
A.5.1. Wanddruckfeld bei rotierendem Strömungsabriß . . . . .	170
A.5.2. Hitzdrahtmessung in Axialnutkavität . . . . .	174
A.5.3. Ergebnisse numerischer Simulationen . . . . .	175