





---

# Zum aerodynamischen Verhalten des Transsonikverdichters bei gestörter Zuströmung

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

## **Dissertation**

vorgelegt von

**Fabian Wartzek, M.Sc.**

aus Krefeld

Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer  
Mitberichterstatter : Prof. Dr.-Ing. R. Niehuis  
Tag der Einreichung : 10.10.2016  
Tag der mündlichen Prüfung : 28.02.2017

Mülheim an der Ruhr 2017  
D17

---



Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,  
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 7

**Fabian Wartzek**

**Zum aerodynamischen Verhalten des  
Transsonikverdichters bei gestörter Zuströmung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5542-9

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)

---

*Für Nadine*

---



---

# 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 Dissertation basiert auf meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe an der Technischen Universität Darmstadt. Meine Zeit am Fachgebiet wurde durch eine Vielzahl an Menschen geprägt. Allen voran gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer, der mir das Erstellen dieser Arbeit nicht nur ermöglicht hat, sondern durch seine stets vertrauensvolle, hilfsbereite und verständnisvolle Art wesentlichen Anteil an Form und Inhalt trägt. Darüber hinaus hat er es geschafft am Fachgebiet ein Umfeld zu schaffen, das mich die Zeit dort immer in guter Erinnerung behalten lässt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Niehuis danke ich nicht nur für das Übernehmen des Korreferats, sondern auch für die zahlreichen fachlichen Diskussionen während der gemeinsamen Zeit im DFG Forschungsprojektes FOR 1066. Im Rahmen dieses Projektes wurden die in dieser Arbeit analysierten Messungen durchgeführt. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel danke ich für die geduldige Organisation der vielen Forschergruppentreffen und seinen fachlichen Input.

Mein besonderer Dank gilt zwei Kollegen. Christoph Biela hat mich seit meinem ersten Klopfen an seinem Büro stets unterstützt und gefördert. Großen Anteil hatte er an der fachlichen Korrektur dieser Arbeit genauso wie an der Vorbereitung der Disputation. Martin Kegalj hat mit der Betreuung meiner Master-Arbeit den Grundstein für diese Dissertation gelegt und mich ebenfalls immer unterstützt. Auch seine Anregungen finden sich an vielen Stellen von Arbeit und Abschlussvortrag wieder.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kollegen am Fachgebiet für die Zeit mit vielen schönen Erinnerungen auch nach der Arbeitszeit bedanken. Allen voran meinen Bürokollegen Felix Holzinger und Christoph Brandstetter ohne die mich der Prüfstand alle Nerven gekostet hätte, genauso meinem Nachfolger Maximilian Jüngst. Auch Barbara Löhr sei an dieser Stelle noch mal für ihre stetige Unterstützung gedankt. Ohne Sie wäre ich sicher an der ein oder anderen bürokratischen Hürde gescheitert.

Auch Christian Kunkel, Sebastian Leichtfuß, Gregor Schmid, Christian Scherhag, Marius Schneider, Faramarz (Fari) Bakhtiari, Johannes Bühler, Marius Schneider, sowie meine Studenten Michael Harsch, Simon Kupjetz und Simon Raabe die mir im

---

---

Laufe der Zeit geholfen haben und somit auch ihren Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten sollen an dieser Stelle dankend erwähnt werden. Nicht zu vergessen ist auch die Unterstützung von Edda Gaudier, Frank Wenner, Erika und Dieter Rossburger, Frauke Wassum und Alexander M. Speck-Mai.

Vor allem für die Unterstützung bei den Arbeiten am Prüfstand gilt mein Dank der Werkstatt des Fachgebiets. Walter Nolde und Marcel Nicolay standen immer mit Rat und Tat zur Seite, genauso wie Michele Di Girolamo, Marcus Meyer und Jochen Rank.

Mein größter Dank gilt meiner gesamten Familie. Meiner Frau für ihre bedingungslose Unterstützung, die mir trotz aller Opfer immer den Rücken freigehalten hat. Meinen Eltern, die mir ein so unkompliziertes Studium ermöglicht haben. Ebenso meinem Bruder, der mich auch fachlich unterstützt hat, meiner Schwägerin und meinen Neffen genauso wie der Familie meiner Frau gilt mein Dank. Ohne sie alle hätte ich weder das Studium, noch die Arbeit, so fertig stellen können, wie es mit ihnen möglich war.

Fabian Wartzek

Mülheim an der Ruhr, 2017

---



---

# Kurzfassung

Wirkungsgrad und Stabilität einer Turbomaschine spielen in der Luftfahrt und bei stationären Industrie-Gasturbinen eine entscheidende Rolle. Dabei wurde in den letzten Jahren die aerodynamische Belastung der Verdichterstufen stetig gesteigert. Eine Herausforderung für den Einsatz solcher hochbelasteter Verdichter ist u. a., dass die hohe Belastung zu einer gesteigerten Sensitivität gegenüber Störungen der Zuströmung führt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Interaktion einer solchen Zuströmstörung mit einer Verdichterstufe untersucht. Mit Hilfe von Störkörpern wurden Ablösungen stromauf des Verdichters erzeugt. Durch die systematische Variation der Größe der generischen Störkörper können die Erkenntnisse allgemein auf die Interaktion eines transsonischen Verdichterrisors mit einer intensiven, lokal begrenzten Druckstörung der Zuströmung übertragen werden. Durchgeführt wurden die Versuche am transsonischen Verdichterprüfstand des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Die am Gehäuse erzeugte Ablösung beeinflusst die Blattspitzenströmung des Rotors. Im stationären Betrieb, bei ausreichender Höhe des Störkörpers, löst lokal begrenzt die Strömung im Rotor ab, während der gesamte Verdichter weiter stabil arbeitet. Dies wird durch ein Maximum der aerodynamischen Belastung des Rotors beim Austritt aus der Störung verursacht. Mit Hilfe eines auf den Messdaten basierenden Strömungsmodells kann das komplexe Strömungsfeld beschrieben werden. Die Untersuchung transienter Laständerungen, bei denen der Gegendruck bis zum Überschreiten der Stabilitätsgrenze kontinuierlich gesteigert wird, zeigt die Auswirkungen auf das Stabilitätsverhalten. Ein speziell entwickelter Algorithmus wird genutzt, um die Vielzahl an Datensätzen automatisiert zu untersuchen. Dabei identifiziert der Algorithmus Störungen des Druckfelds und ermöglicht stabilitätsrelevante Phänomene über den Umfang zu verfolgen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Einfluss auf den Totaldruckaufbau mit dem Minimum des Totaldrucks stromauf des Rotors zu korrelieren scheint. Die Analyse des Stabilitätsverhaltens ergibt, dass sich eine stärkere Störung nicht zwangsläufig negativ auswirkt. Es scheint vielmehr, dass eine intensive Störung zu einem lokalen Zusammenbrechen der stabilen Strömung im Rotor führt. Dieser Zusammenbruch wird durch den Störkörper räumlich fixiert und verhindert, dass sich stabil umlaufende Phänomene, die zum Versagen führen, ausbilden können. Diese dämpfende Komponente scheint bei einer schwachen Störung nicht zu bestehen. Hier kann der negative Einfluss auf das Stabilitätsverhalten sogar größer sein.

---

# Abstract

*Stability and efficiency are major drivers for both turbojet engines and industrial gas turbines. The pressure ratio of the compressor has always been continuously increased during the years. This led to an also increased susceptibility to distortions. During the work presented here the interaction between such an inflow distortion and a compressor stage was investigated. By using distortion bodies, separations were induced upstream of the rotor. A systematic variation of the bodies' size enables to generalize the conclusions for the interaction of a transonic compressor rotor and a strong, locally confined total pressure distortion. The experiments were conducted at the transonic compressor test rig of the Institute of Gas Turbines and Aerospace Propulsion at the Technische Universität Darmstadt.*

*The separation at the casing directly interacts with the rotor tip flow. During steady operation close to the stability limit of the compressor, a delimited separation forms in the rotor, while the whole compressor still works stable. An increase of the blade loading when the rotor leaves the distorted region, leads to this separation at the tip. Using the measurement data a flow model could be derived to explain the complex flow field. The impact on the stability behavior could be analyzed by performing transient operating point sweeps at constant speed. During these sweeps the back-pressure was increased until the compressor stalled. With a specifically developed algorithm the data was analyzed automatically. The algorithm identifies local flow disturbances and enables the tracking of phenomena relevant for the stability around the annulus.*

*The results of this work reveal a correlation between minimum total pressure upstream of the rotor and the resulting drop in total pressure downstream. Furthermore, the transient data reveals that a stronger distortion does not consequently lead to a bigger loss in stability margin. The local separation in the rotor seems to attenuate the formation of stable circulating phenomena that get stronger and finally lead to stall. Weaker distortions seem to not have this damping component. Hence, a weaker distortion can even have a bigger impact on the stability margin than a stronger one.*

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Rahmenbedingungen . . . . .	1
1.2 Das Triebwerk . . . . .	2
1.2.1 Der Einlauf . . . . .	5
1.2.2 Der Verdichter . . . . .	6
1.3 Zielsetzung . . . . .	8
<b>2 Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1 Die Verdichterstufe . . . . .	11
2.2 Sekundärströmungen . . . . .	15
2.2.1 Überblick über das Strömungsfeld . . . . .	15
2.2.2 Der Spaltwirbel . . . . .	16
2.3 Stabilitätsverhalten . . . . .	21
2.3.1 Allgemein . . . . .	22
2.3.2 Spitzenkritische Rotoren . . . . .	22
2.3.3 Instationäre Fluktuationen . . . . .	23
2.3.4 Rotierende Instabilitäten . . . . .	23
2.3.5 <i>Stall</i> -Beginn . . . . .	24
2.4 Einlaufstörungen . . . . .	27
2.4.1 Klassifizierung . . . . .	28
2.4.2 Entstehung . . . . .	30
2.4.3 Modellierung der Einlaufstörung . . . . .	32
2.4.4 Einfluss auf den Verdichter . . . . .	33
2.5 Zusammenfassung . . . . .	40

<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>43</b>
3.1	Der Prüfstand . . . . .	43
3.1.1	Stufenkonfiguration . . . . .	44
3.1.2	Störkörper . . . . .	45
3.2	Messtechnik . . . . .	48
3.2.1	Stufeninstrumentierung . . . . .	48
3.2.2	Instationäre Messtechnik . . . . .	50
3.2.3	Sondenmesstechnik . . . . .	52
3.3	Kennfeldmessung . . . . .	52
3.3.1	Definition des Eintrittsdruckes . . . . .	54
3.3.2	Definition des bezogenen Massenstroms . . . . .	55
3.3.3	Prozedur zur Bestimmung des Kennfeldpunktes . . . . .	55
3.4	Transiente Messungen bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze . . . . .	56
3.4.1	Messablauf . . . . .	57
3.4.2	Filterung der Daten . . . . .	57
3.4.3	Berechnung der Druckziffer . . . . .	58
3.4.4	Bestimmung des <i>Stall</i> -Beginns . . . . .	58
3.4.5	Ausreißerdetektion . . . . .	59
3.5	Messfehler . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Zusammenfassende Ergebnisdarstellung</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse - Stationäre Betriebspunkte</b>	<b>69</b>
5.1	Bestimmung des Eintrittstotaldruckes . . . . .	69
5.2	Einfluss der Störkörper auf das Betriebsverhalten . . . . .	72
5.2.1	Beeinflussung der Stabilitätsgrenze . . . . .	76
5.3	Charakterisierung der Einlaufstörung . . . . .	80
5.3.1	Stationäre Wanddruckmessung . . . . .	82
5.3.2	Instationäre Wanddruckmessung über dem Rotor . . . . .	84
5.4	Strömung am Rotor- und Stufenaustritt . . . . .	92
5.4.1	Referenzkonfiguration . . . . .	92
5.4.2	Störkörper B10 . . . . .	93
5.4.3	Vergleich der Umfangsdaten . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Ergebnisse - Transiente Laständerungen</b>	<b>101</b>
6.1	Verhalten der Referenzkonfiguration . . . . .	102
6.1.1	Detailbetrachtung des Versagensprozesses . . . . .	104
6.1.2	Analyse über den Umfang . . . . .	106
6.1.3	Frequenzanalyse der Referenzkonfiguration . . . . .	107

---

6.2	Stabilitätsverhalten mit gestörter Zuströmung . . . . .	109
6.2.1	Frequenzanalyse . . . . .	110
6.2.2	Untersuchung des Störkörpers B5 . . . . .	113
6.2.3	Untersuchung Störkörper B10 . . . . .	119
6.2.4	Vergleich der Störkörper . . . . .	126
6.2.5	Vergleich des instationären Verhaltens . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>133</b>
7.1	Fazit . . . . .	133
7.2	Ausblick . . . . .	135
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>A</b>	<b>Einfluss des Verdichters auf den Einlauf</b>	<b>157</b>
<b>B</b>	<b>Die verwendeten Messgitter</b>	<b>158</b>
<b>C</b>	<b>Vergrößerte Darstellung der Einzelzeitschritte - <i>Stall</i>-Fahrt B10</b>	<b>162</b>