
Aerodynamisches Verhalten eines transsonischen Gasturbinenverdichters unter realistischen Einlaufstörungen

Jan Werner



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Band 23 / 2025

Forschungsberichte aus dem Institut für
Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer

Aerodynamisches Verhalten eines transsonischen Gasturbinenverdichters unter realistischen Einlaufstörungen

*Aerodynamic Behaviour of a Transonic Gas Turbine Compressor under
Realistic Inlet Distortions*

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Jan Werner aus Kassel

Tag der Einreichung: 05.03.2024, Tag der Prüfung: 19.06.2024

Darmstadt – D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer
2. Gutachten: Prof. i.R. Dr.-Ing. R. Niehuis



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raum-
fahrtantriebe

Aerodynamisches Verhalten eines transsonischen Gasturbinenverdichters unter realistischen Einlaufstörungen

Aerodynamic Behaviour of a Transonic Gas Turbine Compressor under Realistic Inlet Distortions

Genehmigte Dissertation von Jan Werner aus Kassel

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer

2. Gutachten: Prof. i.R. Dr.-Ing. R. Niehuis

Tag der Einreichung: 05.03.2024

Tag der Prüfung: 19.06.2024

Darmstadt – D 17

Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 23

Jan Werner

**Aerodynamisches Verhalten
eines transsonischen Gasturbinenverdichters
unter realistischen Einlaufstörungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2025

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9917-1
PDF-ISBN 978-3-8191-0004-8
ISSN 2364-4761
eISSN 3052-0584
<https://doi.org/10.2370/9783819100048>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de



Für Alina





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 entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit konnte ich mit viel Freude an immer neuen Herausforderungen arbeiten und mich sowohl fachlich als auch persönlich weiterentwickeln. Ich möchte mich bei Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer für das große Vertrauen, den stetigen Rückhalt und die gestalterischen Freiheiten herzlich bedanken.

Bei Prof. i.R. Dr.-Ing. R. Niehuis bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation und die damit verbundenen Mühen.

Bei Frau Löhr bedanke ich mich für die tatkräftige Unterstützung bei allen organisatorischen Angelegenheiten sowie bei der Administration der Projekte.

Ein großes Dankeschön gilt außerdem allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Werkstatt des Fachgebiets für die flexible Unterstützung bei Prüfstandsumbauten sowie das Fertigen von Prüfstandskomponenten und Instrumentierungen.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet möchte ich für eine unvergessliche Zeit mit vielen schönen Erinnerungen während und außerhalb der Arbeitszeit danken. Mein besonderer Dank gilt Christoph Brandstetter, der mich seit Beginn meiner Bachelorthesis zunächst als Betreuer und später als Kollege begleitet, unterstützt und gefördert hat. Ein ebenso großer Dank geht an Christian Kunkel, der den in dieser Arbeit eingesetzten Prüfstand aufgebaut hat und ohne den die Messungen nicht möglich gewesen wären. Von beiden konnte ich fachlich sehr viel lernen und mich mit jedem Anliegen stets an sie wenden.

Vielen Dank an Daniel, Max und Silas für die unzähligen Stunden des gemeinsamen Messens, Schraubens und Problemlösens. Mit eurer fachlichen und moralischen Unterstützung habe ich so manche Rückschläge überwinden können, ohne die Nerven zu verlieren. Danke auch an die Kollegen des Verdichterteams des TSV1 mit Max, Steffen, Jonas, Fabian, Ben und Nicklas für den guten Austausch und die gegenseitige Unterstützung.

Nicht zu vergessen ist die kontinuierliche Unterstützung durch HiWis und studentische Abschlussarbeiten, ohne welche die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Ich möchte mich insbesondere bei Steven, Fritz, Marvin und Marco

für euren Beitrag zur Erstellung dieser Dissertation bedanken.

Die Messungen dieser Arbeit wurden im Rahmen des Verbundprojektes AG Turbo ECOFLEX-Turbo durchgeführt. Finanziert wurde das Projekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Förderkennzeichen 03ET7092D) sowie durch den Projektpartner Siemens Energy AG.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Siemens Energy für die gute Zusammenarbeit und die Möglichkeit zur Veröffentlichung der Ergebnisse bedanken. Ein besonderer Dank geht an Sebastian Robens für die Unterstützung bei den numerischen Strömungssimulationen.

Mein größter Dank gilt meiner ganzen Familie, die mich immer unterstützt und mir einen bedingungslosen Rückhalt gibt. Allem voran danke ich dir Alina. Danke, dass du mich nach Rückschlägen immer wieder ermutigt hast und immer an mich glaubst. Danke auch, dass du so viele Einschränkungen in Kauf genommen und mir stets den Rücken freigehalten hast. Ohne dich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Jan Werner

Darmstadt, 2024



Kurzfassung

In Gasturbinenkraftwerken für zukünftige klimaneutrale Stromsysteme kommt dem Verdichter eine zentrale Rolle zu. Um die Anforderung einer hohen Betriebsflexibilität bei einem gleichzeitig hohen Wirkungsgrad zu erreichen, erfolgt die Entwicklung moderner Gasturbinenverdichter mit Hilfe automatisierter Auslegungsverfahren unter gleichförmigen Zuströmbedingungen. In einem realen Gaskraftwerk liegen jedoch aufgrund der Luftzuführung über ein komplexes Einlaufsystem inhomogene Strömungsbedingungen an der Verdichtereintrittsebene vor.

Der Einfluss dieser Einlaufstörungen auf das Betriebsverhalten einer Verdichtersfrontstufe wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels experimenteller und begleitender numerischer Untersuchungen analysiert. Die Experimente wurden am Transonikverdichterprüfstand 2 des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Die Kopplung einer maschinenähnlichen Zuströmstrecke mit einer repräsentativen Verdichterstufe ermöglicht die Untersuchung unter anwendungsnahen Betriebsbedingungen. Über einen direkten Vergleich mit einer Referenzkonfiguration mit homogenen Zuströmbedingungen wird der isolierte Einfluss der Ansaugstrecke ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich infolge der Strömungsumlenkung im Zuluftsystem zwei gegenläufig rotierende Wirbel ausbilden, die eine kombinierte Winkel- und Totaldruckstörung am Eintritt des Verdichters hervorrufen. Die Einlaufstörung wirkt sich auf das globale, stationäre Betriebsverhalten der Verdichterstufe in Form eines erhöhten Eintrittsdruckverlusts aus. Darüber hinaus breiten sich die Strömungsinhomogenitäten durch den Verdichter hindurch aus und beeinflussen das Betriebsverhalten der nachfolgenden Stufen in der Gesamtmaschine. Die axiale Störungsförtpflanzung durch den Rotor und den Stator verändert sich dabei grundlegend mit dem Betriebspunkt des Verdichters. Der durch die Einlaufstörung beeinflusste Umfangssektor am Stufenaustritt nimmt mit steigendem Drosselgrad sowohl in der Ausdehnung als auch in der Intensität zu.

Zusätzlich beeinflusst das Zuluftsystem das transiente Verhalten der Verdichterstufe an der aerodynamischen Stabilitätsgrenze. Zum einen wird für das Vorhandensein von Einlaufstörungen eine Erweiterung der Kennfeldbreite beobachtet. Die Variation des Rotorbetriebspunktes über den Umfang verhindert, dass sich umlaufende Störungen ausbilden können, die zum Strömungszusammenbruch führen. Zum anderen verändert sich mit der Zuströmgeometrie die Varianz und die Ausprägung der Phänomene, die sich nach Überschreitung der Stabilitätsgrenze einstellen.

Abstract

The compressor plays a central role in gas turbine power plants for future climate-neutral electricity systems. In order to meet the requirements of high operating flexibility and high efficiency at the same time, modern gas turbine compressors are developed using automated design methods under uniform inflow conditions. However, in a real gas-fired power plant inhomogeneous flow conditions exist at the compressor inlet plane due to the air supply via a complex intake system.

The influence of these inlet distortions on the operating behaviour of a compressor front stage is analysed in this work by means of experimental and accompanying numerical investigations. The experiments were carried out at the Transonic Compressor Darmstadt test rig 2 of the Institute of Gas Turbines and Aerospace Propulsion at Technical University of Darmstadt. The coupling of a machine-like intake section with a representative compressor stage enables the investigation under operating conditions close to application. A direct comparison with a reference configuration with homogeneous inflow conditions is used to determine the isolated influence of the inlet section.

The results show that the flow deflection in the intake system leads to the formation of two counter-rotating vortices that cause a combined swirl and total pressure distortion at the inlet of the compressor. The inlet distortion effects the global, stationary operating behaviour of the compressor stage in the form of an increased inlet pressure loss. Besides, the flow inhomogeneities propagate through the compressor and influence the operating behaviour of the downstream stages in the overall machine. The axial propagation of the distortion through the rotor and the stator changes fundamentally with the operating point of the compressor. The circumferential sector at the stage outlet influenced by the inlet distortion grows in extent and amplitude as the degree of throttling is increased.

In addition, the intake system influences the transient behaviour of the compressor stage at the aerodynamic stability limit. On the one hand, an extension of the stability limit is observed for the presence of inlet distortions. The variation of the rotor operating point over the circumference prevents the formation of propagating disturbances that lead to stall. On the other hand, the inflow geometry has an effect on the variance and the characteristics of the phenomena occurring after the stability limit is exceeded.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Nomenklatur	xix
1 Einleitung	1
1.1 Die Rolle der Gasturbine im Rahmen der Energiewende	3
1.1.1 Spezifische Anforderungen an den Gasturbinenverdichter	5
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft	9
2.1 Funktionsweise des transsonischen Axialverdichters	9
2.1.1 Verdichterkennfeld	13
2.1.2 Passagenströmung und Sekundärströmungseffekte	16
2.2 Stabilitätsverhalten	19
2.2.1 Rotierender Strömungsabriss	20
2.2.2 Beginn des Strömungszusammenbruchs	21
2.2.3 Verdichterpumpen	23
2.3 Einlaufstörungen	25
2.3.1 Klassifizierung der Störungsarten	26
2.3.2 Methoden zur Untersuchung des Störungseinflusses auf das Verdichterverhalten	30
2.4 Zusammenfassung und Einordnung der vorliegenden Arbeit	38
3 Versuchsaufbau und Auswertemethodiken	41
3.1 Transsonischer Verdichterprüfstand	41
3.1.1 Prüfstandskonfigurationen	43
3.2 Versuchsdurchführung und Messtechnik	45
3.2.1 Erweiterung der Messverfahren	47
3.2.2 Stationäre Messtechnik	48
3.2.3 Instationäre Messtechnik	51
3.3 Kenngrößenberechnung	56



3.4	Numerische Strömungssimulation	59
4	Ergebnisse – Stationäre Betriebspunkte	63
4.1	Experimentelle Untersuchung der Referenzkonfiguration	63
4.1.1	Verdichtereintritt	64
4.1.2	Stufenaustritt	64
4.1.3	Rotorebene	67
4.1.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Referenzkonfiguration	71
4.2	Experimentelle Untersuchung der Ansaughauskonfiguration	71
4.2.1	Charakterisierung der Einlaufstörung	72
4.2.2	Globaler Einfluss der Einlaufstörung auf das Verdichterkennfeld	76
4.2.3	Stufenaustritt	78
4.2.4	Rotorebene	85
4.2.5	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Ansaughauskonfiguration	92
4.3	Numerische Untersuchung der Interaktion von Einlaufstörung und Verdichter	94
4.3.1	Validierung mit experimentellen Daten	94
4.3.2	Einfluss des VIGVs auf die Störungsausbreitung	97
4.3.3	Axiale Störungsausbreitung durch den Verdichter	99
4.3.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen von Referenz- und Ansaughauskonfiguration	106
5	Ergebnisse – Transientes Betriebsverhalten	109
5.1	Beginn des aerodynamischen Versagensprozesses	109
5.1.1	Einfluss der Zuströmung auf die Störungsentstehung und -ausbreitung	110
5.1.2	Störungstopologie und strömungsmechanische Ursachen . . .	117
5.1.3	Ergebnisse der Untersuchung des Versagensprozesses	119
5.2	Betriebsverhalten nach Überschreitung der Stabilitätsgrenze	120
5.2.1	Einfluss der Zuströmkonfiguration auf die Variation der Stallvarianten	121
5.2.2	Einfluss der Zuströmkonfiguration auf das Verdichterpumpen	123
5.2.3	Ergebnisse der Untersuchung des Betriebsverhaltens nach Überschreitung der Stabilitätsgrenze	126
6	Zusammenfassung und Ausblick	127
6.1	Zusammenfassung	127
6.2	Ausblick	129

