
Untersuchung eines Tandemstators in einem transsonischen Axialverdichter

Jonas Foret



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Band 19 / 2022

Forschungsberichte aus dem Institut für
Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe

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

Untersuchung eines Tandemstators in einem transsonischen Axialverdichter

Investigation of a Tandem Stator in a Transonic Axial Compressor

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Jonas Foret aus Heidelberg

Tag der Einreichung: 02.02.2022, Tag der Prüfung: 25.05.2022

Darmstadt – D 17

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

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. V. Gümmer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raum-
fahrtantriebe

Untersuchung eines Tandemstators in einem transsonischen Axialverdichter
Investigation of a Tandem Stator in a Transonic Axial Compressor

Genehmigte Dissertation von Jonas Foret aus Heidelberg

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. V. Gümmer

Tag der Einreichung: 02.02.2022

Tag der Prüfung: 25.05.2022

Darmstadt – D 17

Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 19

Jonas Foret

**Untersuchung eines Tandemstators
in einem transsonischen Axialverdichter**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8848-9

ISSN 2364-4761

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 Anna-Sophie



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 entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt. Währenddessen profitierte ich von großem Vertrauen und vielen Freiheiten. Dafür möchte ich Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer herzlich danken.

Bei Prof. Dr.-Ing. Volker Gümmer bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation und die fachlichen Anregungen.

Für die Unterstützung bei administrativen und organisatorischen Projektangelegenheiten bedanke ich mich recht herzlich bei Frau Löhr.

Ein großes Dankeschön gebührt ebenfalls den Mitarbeitern der Fachgebiets-Werkstatt für die flexible und präzise Fertigung vieler Statorkomponenten, ohne die dieses Projekt in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Die Messungen der vorliegenden Dissertation erfolgten im Rahmen des Verbundprojektes AG-Turbo COOREFlex-turbo 1.2.6b, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET7071L gefördert wurde. Für die Ermöglichung des Projektes und die Finanzierung möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Beim Projektpartner Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co KG bedanke ich mich für die Freigabe der Daten zur Veröffentlichung. Außerdem gilt ein großer Dank der Verdichteraerodynamik-Gruppe von Rolls-Royce Deutschland für die kontinuierliche und gute Zusammenarbeit sowie den fachlichen Austausch. Vielen Dank insbesondere an Bernd Becker für die zahlreichen inhaltlichen Diskussionen und Anregungen.

Eine Promotion ist teilweise ein steiniger Weg, aber jederzeit auch mit vielen spannenden Erfahrungen und Herausforderungen gespickt. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle bei meinem Schwager Daniel und meinen ehemaligen Betreuern Fabian Bleier und Dominik Woelki bedanken, die mir diesen Weg erst ermöglicht haben. Allen (ehemaligen) Kollegen am Fachgebiet, die mich auf meinem Weg begleitet haben, möchte ich herzlich für die unvergessliche Zeit danken. Vielen Dank an Max, Steffen und Daniel – dafür, dass ihr mich in meiner Anfangszeit so herzlich ins Team aufgenommen und unterstützt habt. Vielen Dank auch an die Gruppe des

TSV2 – Christian, Jan, Max und Silas – für den Austausch und die spontanen Grillabende. Vielen Dank Johannes für die zeitintensiven Erklärungen zu numerischen Strömungssimulationen und die gemeinsamen Sporteinheiten zum Abschalten. Ganz besonders möchte ich mich bei Daniel und Fabian bedanken, für die Unterstützung beim Schrauben, Messen und Fachsimpeln. Die tolle Arbeitsatmosphäre mit euch war einzigartig! Mit euch verliere ich zwar zwei wunderbare Kollegen, habe jedoch auch zwei Freunde gewonnen – vielen Dank!

Nicht zu vergessen ist auch die Unterstützung durch studentische Arbeiten, die bei der Vorbereitung des Prüfstandes, der Entwicklung von Methoden und der Durchführung von numerischen Strömungssimulationen einen erheblichen Beitrag zur Erstellung dieser Dissertation geleistet haben. Insbesondere gilt hier mein Dank Nicklas, Colette, Alexandra und Vinzenz.

Vielen Dank auch an Bastian, der diese Arbeit hinsichtlich Rechtschreibung und Grammatik Korrektur gelesen hat, obwohl das fachliche Interesse sicherlich nicht im Bereich der Verdichterforschung liegt.

Das größte Dankeschön geht an meine Familie, für den bedingungslosen Rückhalt und die Unterstützung in allen Lebenslagen. Allen voran gilt mein Dank Anna – dafür, dass du so viele Einschränkungen in Kauf genommen hast und für deine unermüdlichen Aufmunterungen nach Rückschlägen. Dafür, dass du immer an mich geglaubt hast und mich ermutigt hast, wenn ich selbst mal zweifelte.

Jonas Foret

Wetzlar, 2022



Kurzfassung

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der experimentellen Untersuchung eines Tandemstators in einer transsonischen Axialverdichterstufe. Das Konzept des Tandemstators ermöglicht eine optimierte Belastungsverteilung innerhalb der Verdichterstufe und bietet damit einen vielversprechenden Ansatz, die Leistungsfähigkeit von Verdichtern für zukünftige Flugzeugtriebwerke zu steigern.

Die experimentellen Untersuchungen werden am Transsonischen Verdichterprüfstand des Fachgebiets Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Der Prüfstand ist repräsentativ für Frontstufen moderner Hochdruckverdichter, wodurch anwendungsnahe Betriebsbedingungen erzielt werden. Neben hohen relativen Strömungsgeschwindigkeiten und den daraus resultierenden Stoßsystemen werden Kompressibilitätseffekte und Sekundärströmungsphänomene berücksichtigt. Sekundärströmungsphänomene, wie Spalt- und Leckageströmungen als auch Seitenwandeffekte, beeinflussen die komplexe Strömungstopologie in Tandemstatoren maßgeblich. Durch den Einsatz umfangreicher Messtechniken wird der Tandemstator und dessen Einfluss auf die Verdichterstufe detailliert untersucht.

Anhand umfassender, experimenteller Messdaten wird eine gesteigerte Verdichterleistungsfähigkeit durch den Einsatz eines Tandemstators über den gesamten Betriebsbereich nachgewiesen. Dabei werden sowohl das Totaldruckverhältnis als auch der Wirkungsgrad je nach Betriebsbedingungen erheblich gesteigert. Detailanalysen zeigen, dass der Tandemstator hohen aerodynamischen Profilbelastungen, die unter hohen Lastanforderungen entstehen, standhält. Im Vergleich zu einem Stator mit konventioneller Beschaukelung sind die Totaldruckverluste im Tandemstator, vor allem ganzheitlich betrachtet, geringer. Bei Lastanforderungen im niedrigen Teillastbereich wirken sich verringerte Totaldruckverluste sogar noch deutlicher auf die Verdichterleistungsfähigkeit aus. Die experimentellen Ergebnisse werden durch numerische Strömungssimulationen hinsichtlich der Strömungstopologie innerhalb der Tandemschaukel erweitert.

Weiterhin wird gezeigt, dass der Tandemstator den stromauf liegenden Rotor innerhalb der Verdichterstufe weder aerodynamisch noch aeroelastisch negativ beeinflusst und somit keinen Einfluss auf das Verhalten an der Stabilitätsgrenze hat.

Folglich können die Ergebnisse dieser Arbeit als Nachweis zum Einsatz eines Tandemstators in zukünftigen Triebwerksverdichtern verstanden werden, da hohe Druckverhältnisse bei hohen Wirkungsgraden über den gesamten Betriebsbereich erreicht werden. Gleichzeitig kann die Schaufelanzahl gegenüber einem konventionellen Stator um mehr als 30 % reduziert werden. Dies begünstigt aktuelle Entwicklungstrends, kleinere und leichtere Hochdruckverdichter mit einer erhöhten Leistungsdichte in zukünftigen Flugzeugtriebwerken einzusetzen.

Abstract

This work focuses on the experimental investigation of a tandem stator in a transonic axial compressor stage. The concept of the tandem stator enables an optimized loading distribution within the compressor stage, and thus offers a promising approach to increase the performance of future aircraft engine compressors.

The experimental investigations are carried out at the Transonic Compressor Darmstadt test rig of the Institute of Gas Turbines and Aerospace Propulsion at Technical University of Darmstadt. The test rig is representative for modern high-pressure compressor front stages, ensuring operating conditions close to application. Besides high relative flow velocities and resulting shock systems, compressibility effects and secondary flow phenomena are taken into account. Secondary flow phenomena such as gap and leakage flows as well as sidewall effects significantly influence the complex flow topology in tandem stators. By using extensive measurement techniques, the tandem stator and its influence on the compressor stage is investigated in detail.

Based on comprehensive experimental measurement data, an increased performance of the compressor with tandem stator is demonstrated over the entire operating range. Both the total pressure ratio and efficiency are significantly increased, depending on the operating conditions. Detailed analyses show that the tandem stator can withstand high aerodynamic loadings occurring at high loading requirements. Compared to a stator with conventional vanes, the total pressure losses in the tandem stator are lower, especially from a holistic perspective. For low part loading requirements, reduced total pressure losses have an even more significant effect on compressor performance. The experimental results are extended, using numerical simulations with respect to the flow topology within the tandem stator.

Furthermore, it is shown that the tandem stator does not negatively influence the upstream rotor within the compressor stage, neither aerodynamically nor aeroelastically, and thus has no influence on the behavior at the stability limit.

Consequently, the results of this work can be understood as a proof of use for tandem stator applications in future engine compressors, since high pressure ratios in conjunction with high efficiencies are achieved over the entire operating range. At the same time, the number of vanes can be reduced by more than 30% compared to a conventional stator. This favors current development trends to use smaller and lighter high-pressure compressors with an increased power density in future aircraft engines.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------------|
| Abbildungsverzeichnis | xv |
| Tabellenverzeichnis | xxi |
| Nomenklatur | xxiii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Anforderungen an moderne Triebwerksverdichter | 3 |
| 1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit | 7 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 8 |
| 2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft | 9 |
| 2.1 Funktionsweise eines Axialverdichters | 9 |
| 2.1.1 Ähnlichkeitskenngrößen | 10 |
| 2.1.2 Verdichterkennfeld | 14 |
| 2.1.3 Verdichterstabilität | 16 |
| 2.1.4 Verdichteraerodynamik in transsonischen Verdichtern | 19 |
| 2.1.5 Einfluss von Schaufelwinkeländerungen | 20 |
| 2.2 Verlustmechanismen in Verdichterstatoren | 21 |
| 2.2.1 Strömungsverluste durch Reibung | 22 |
| 2.2.2 Kanalwirbel | 23 |
| 2.2.3 Hufeisenwirbel | 24 |
| 2.2.4 Hinterkantenwirbel | 24 |
| 2.2.5 Spaltwirbel | 25 |
| 2.2.6 Eckenablösung | 26 |
| 2.2.7 Leckageströmung in nicht-rotierenden Schaufelreihen | 27 |
| 2.3 Funktionsweise des Tandemstators | 28 |
| 2.4 Einordnung der Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext | 31 |
| 3 Versuchsträger, Messtechniken und Auswertemethodiken | 35 |
| 3.1 Transsonischer Verdichterprüfstand | 35 |
| 3.1.1 Stufenkonfigurationen | 35 |
| 3.1.2 Statormodul | 37 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2 | Experimente und Messtechnik | 39 |
| 3.2.1 | Bestimmung der Verdichterleistungsfähigkeit mittels stationärer Messtechnik | 40 |
| 3.2.2 | Bestimmung des Rotorverhaltens mittels instationärer Messtechnik | 43 |
| 3.2.3 | Detailanalyse der Aerodynamik mittels Sondenmesstechnik | 45 |
| 3.2.4 | Messtechnik zur Betriebsüberwachung | 46 |
| 3.2.5 | Messgenauigkeit | 47 |
| 3.3 | Kenngrößen | 52 |
| 3.4 | Numerische Strömungssimulationen | 56 |
| 3.4.1 | Grundlagen numerischer Strömungssimulationen | 57 |
| 3.4.2 | Numerisches Setup | 58 |
| 3.4.3 | Validierung der Daten | 60 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 61 |
| 4.1 | Gesamtbetriebsverhalten | 61 |
| 4.1.1 | Vergleich zur Referenzkonfiguration | 61 |
| 4.1.2 | Ursache für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit | 67 |
| 4.2 | Variation der Schaufelwinkel | 71 |
| 4.2.1 | Optimierung bei Vollastdrehzahl | 71 |
| 4.2.2 | Optimierung bei Teillastdrehzahl | 78 |
| 4.3 | Einfluss des Tandemstators auf die Verdichterstabilität | 84 |
| 4.4 | Detailuntersuchung des Tandemstators | 98 |
| 4.4.1 | Aerodynamische Belastung | 98 |
| 4.4.2 | Robustheit gegenüber Fehlanströmung | 106 |
| 4.4.3 | Einfluss der Leckageströmung | 117 |
| 4.4.4 | Vergleich mit numerischen Simulationen | 123 |
| 4.5 | Schlussfolgerung der Ergebnisse und Übertragbarkeit auf die reale Anwendung | 129 |
| 5 | Zusammenfassung | 131 |
| 5.1 | Fazit | 133 |
| 5.2 | Ausblick | 133 |
| | Literaturverzeichnis | 135 |
| A | Anhang | 151 |
| A.1 | Grundlegende Gleichungen der Strömungsmechanik | 151 |
| A.2 | Synchrone und nicht-synchrone Schaufelschwingungen | 152 |

| | | |
|-------|--|-----|
| A.3 | Ergänzungen zu Experimenten und Messtechnik | 153 |
| A.3.1 | Messmatrix | 153 |
| A.3.2 | Anordnung der Messtechnik | 154 |
| A.3.3 | Interpolationsmethode zur Bestimmung der Verdichterleistungs-fähigkeit | 156 |
| A.3.4 | Periodizität der Abströmung im TSV | 157 |
| A.3.5 | Methodik zum Einsatz piezoresistiver Wanddrucksensoren unter Verwendung eines Einlaufbelages | 158 |
| A.3.6 | Methode zur Bestimmung des Leckagemassenstroms | 160 |
| A.3.7 | Ergänzungen zu Messgenauigkeit | 162 |
| A.4 | Ergänzungen zu Kenngrößen | 167 |
| A.4.1 | Korrekturmethode der Fünflochsondendaten | 167 |
| A.4.2 | Messebenenübergreifende Auswertemethode | 169 |
| A.4.3 | Vergleich zwischen Austrittskämmen und Fünflochsonde | 170 |
| A.5 | Ergänzungen zu numerischen Strömungssimulationen | 171 |
| A.5.1 | Beurteilung der Wandauflösung | 171 |
| A.5.2 | Beurteilung der Netzqualität | 172 |
| A.5.3 | Beurteilung des Konvergenzverhaltens | 173 |
| A.6 | Ergänzungen zu experimentellen Ergebnissen | 175 |
| A.6.1 | Einfluss des Eintrittsdruckes auf bezogene Kenngrößen | 175 |
| A.6.2 | Einfluss der VIGV-Variation bei Teillastdrehzahl N3 | 176 |
| A.6.3 | Einfluss des Tandemstators auf die Verdichterstabilität | 178 |
| A.6.4 | Blockageeffekte im Stator an der Sperrgrenze | 181 |



Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Entwicklung der Passagierkilometer im Luftfahrtverkehr seit 1980 | 1 |
| 1.2 | Flugzeugtriebwerk Rolls-Royce Trent XWB und Schnitt durch den Hochdruckverdichter des Triebwerks GP7200 | 2 |
| 2.1 | Zustandsänderung in einer Verdichterstufe im h-s-Diagramm | 10 |
| 2.2 | Schematische Darstellung eines Verdichterkennfeldes | 15 |
| 2.3 | Mechanismus einer rotierenden Ablösung in einem Verdichterroter | 16 |
| 2.4 | Charakteristische Auslenkungen bei Schaufelschwingungen und gekoppelten Schwingungen im Schaufelverbund | 18 |
| 2.5 | Geschwindigkeitsdreiecke eines transsonischen Verdichterroterors | 19 |
| 2.6 | Einfluss der Schaufelwinkel von VIGV und VSV auf die Geschwindigkeitsdreiecke | 21 |
| 2.7 | Entstehung von Reibungsverlusten und der Nachlaufdele | 22 |
| 2.8 | Entstehung des Kanalwirbels | 23 |
| 2.9 | Entstehung des Hufeisenwirbels | 24 |
| 2.10 | Entstehung des Hinterkantenwirbels | 25 |
| 2.11 | Entstehung des Spaltwirbels | 26 |
| 2.12 | Entstehung der Eckenablösung | 26 |
| 2.13 | Leckageströmung in nicht-rotierenden Schaufelreihen von Axialverdichtern | 27 |
| 2.14 | Funktionsweise eines Tandemstators | 28 |
| 2.15 | Übersicht der Literaturstudie und Vergleich zweier Tandemstatoren | 33 |
| 3.1 | Schnittansicht des Transsonischen Verdichterprüfstands TSV sowie der Stufenkonfigurationen REF und OLC | 36 |
| 3.2 | Gegenüberstellung der Statormodule | 38 |
| 3.3 | Schematische Darstellung der Messprozeduren | 40 |
| 3.4 | Schematische Darstellung der Mess- und Auswerteprozedur für stationäre Messungen | 42 |
| 3.5 | Schematische Darstellung der Sensoranordnung und Methodik zur Auswertung der instationären Messtechnik | 43 |
| 3.6 | Schematische Darstellung der Fünflochsonde | 46 |
| 3.7 | Gaußsche Normalverteilung einer Messreihe | 48 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.8 | Definition von geometrischen Abmessungen der Statorbeschaufelung und der Inzidenz | 55 |
| 3.9 | Schematische Darstellung der räumlichen Diskretisierung zur Finite-Volumen-Methode | 58 |
| 3.10 | Darstellung des Rechengebietes mit charakteristischen Eigenschaften und Randbedingungen | 59 |
| 4.1 | Vergleich des Verdichter kennfeldes zwischen REF und OLC bei nominalen VIGV- und VSV-Schaufelwinkeln | 62 |
| 4.2 | Vergleich der Radialprofile des Totaldruckverhältnisses zwischen REF und OLC | 63 |
| 4.3 | Vergleich der zweidimensionalen Strömungsfelder des Totaldruckverhältnisses am Austritt zwischen REF und OLC | 66 |
| 4.4 | Methode zur Interpolation von Kennfeldpunkten | 68 |
| 4.5 | Einfluss des isentropen Wirkungsgrades und des spezifischen Arbeitseintrages auf die Leistungsfähigkeit und die Verluste | 69 |
| 4.6 | Einfluss der Schaufelwinkelvariation bei Volllastdrehzahl N1 für die OLC-Konfiguration | 72 |
| 4.7 | Einfluss der Schaufelwinkelvariation auf die Radialprofile bei Volllastdrehzahl N1 für die OLC-Konfiguration | 74 |
| 4.8 | Einfluss der Schaufelwinkelvariation auf die zweidimensionalen Totaldruckfelder am Stufenaustritt bei Volllastdrehzahl N1 für die OLC-Konfiguration | 76 |
| 4.9 | Einfluss der Schaufelwinkelvariation bei Teillastdrehzahl N3 für die OLC-Konfiguration | 79 |
| 4.10 | Einfluss der VSV-Schaufelwinkelvariation auf die Radialprofile am Stufenaustritt bei Teillastdrehzahl N3 für die OLC-Konfiguration | 81 |
| 4.11 | Einfluss der VSV-Schaufelwinkelvariation auf die zweidimensionalen Totaldruckfelder am Stufenaustritt bei Teillastdrehzahl N3 für die OLC-Konfiguration | 82 |
| 4.12 | Vergleich des Verdichter kennfeldes zwischen REF und OLC bei optimierten VIGV- und VSV-Schaufelwinkeln | 84 |
| 4.13 | Beurteilung des Stabilitätsgrenzenabstandes und des Rotorspitzen-spaltes bei Volllastdrehzahl N1 für REF und OLC | 85 |
| 4.14 | Radiale Verteilung von Totaldruckverhältnis, Strömungswinkel, Machzahl und Totaldruckverlustkoeffizient am Rotor- und Stufen-austritt für REF und OLC | 87 |
| 4.15 | Gemittelter Wanddruck im Bereich der Rotorblattspitze für REF und OLC bei Volllastdrehzahl N1 | 90 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.16 | Druckfluktuationen während spezifischen Umdrehungen für REF und OLC bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze | 91 |
| 4.17 | Frequenzspektren aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze – Konfiguration REF | 93 |
| 4.18 | Frequenzspektren aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze – Konfiguration OLCnom | 94 |
| 4.19 | Bandpass-gefilterte Amplitudenverläufe aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze für REF und OLC | 96 |
| 4.20 | Radialprofile zur Beurteilung der Belastungsverteilung der Statoren von REF und OLC | 98 |
| 4.21 | Zweidimensionale Strömungsfelder am Stufenaustritt zur Beurteilung der Umlenkung der Statoren von REF und OLC | 101 |
| 4.22 | Radialprofile zur Beurteilung des statischen Druckaufbaus und der Verluste der Statoren von REF und OLC | 102 |
| 4.23 | Totaldruckverluste stromab der Statorschaufelpassage für REF und OLC | 104 |
| 4.24 | Radialprofile zum Einfluss auf den Anströmwinkel des Tandemstators | 107 |
| 4.25 | Umlenkung und Totaldruckverluste des Tandemstators bei Variation des Anströmwinkels entlang der Kennlinie N1 | 108 |
| 4.26 | Umlenkung, Verluste und statischer Druckanstiegskoeffizient der Statoren von REF und OLC durch Variation des Anströmwinkels entlang der Kennlinie N1 | 109 |
| 4.27 | Umlenkung, Verluste und statischer Druckanstiegskoeffizient des Tandemstators durch Variation des Anströmwinkels entlang der Kennlinie N1 auf verschiedenen Kanalhöhen | 111 |
| 4.28 | Radiale Verteilung der Umlenkung, des Totaldruckverlustes und des Verzögerungsverhältnisses des Tandemstators bei Variation des VSV-Schaufelwinkels | 113 |
| 4.29 | Umlenkung, Verluste und statischer Druckaufbau des Tandemstators durch Variation des VSV-Schaufelwinkels | 114 |
| 4.30 | Zweidimensionale Darstellung der Totaldruckverluste und der Abströmwinkel des Tandemstators bei Variation des VSV-Schaufelwinkels | 115 |
| 4.31 | Totaldruckverluste des Tandemstators über die Schaufelpassage auf verschiedenen Schaufelhöhen bei Variation des VSV-Schaufelwinkels | 117 |
| 4.32 | Einfluss des Leckagemassenstroms auf das Verdichterkennfeld bei Volllastdrehzahl N1 | 118 |
| 4.33 | Einfluss des Leckagemassenstroms auf den Totaldruck am Stufenaustritt bei Volllastdrehzahl N1 | 120 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.34 | Einfluss des Leckagemassenstroms auf das Verdichterkennfeld bei Teillastdrehzahl N3 | 121 |
| 4.35 | Einfluss des Leckagemassenstroms auf den Totaldruck am Stufenaustritt bei Teillastdrehzahl N3 | 122 |
| 4.36 | Vergleich zwischen experimentellen Daten und numerischen Simulationen | 124 |
| 4.37 | Stromlinien entlang der Oberflächen von Schaufelprofilen und Nabe im Tandemstator | 125 |
| 4.38 | Entwicklung des Totaldruckverlustes innerhalb der Statorschaufelpassage | 126 |
| 4.39 | Entwicklung des Totaldruckverlustes im Nachlauf der Schaufelprofile | 127 |
| 4.40 | Verlauf der durch den Spaltwirbel beeinflussten Stromlinien an Gehäuse und Nabe | 128 |
| | | |
| A.1 | Exemplarisches Campbell-Diagramm für einen Verdichterroter . . . | 152 |
| A.2 | Fotos der eingesetzten Messtechnik | 155 |
| A.3 | Übersicht und Anordnung der eingesetzten Instrumentierung . . . | 155 |
| A.4 | Interpolationsmethode der Druck- und Temperaturmessdaten aus den Messkämmen | 156 |
| A.5 | Gegenüberstellung von Radialprofilen und zweidimensionalen Strömungsfeldern des Totaldruckes am Stufenaustritt aus zwei unterschiedlichen Messkämmen | 157 |
| A.6 | Einfluss des Rückversatzes der piezoresistiven Wanddrucksensoren auf das Messsignal | 159 |
| A.7 | Schematische Darstellung zur Auswertemethode der piezoresistiven Wanddrucksensoren des Axialarrays | 159 |
| A.8 | Darstellung des Leckagepfades unterhalb des Statormoduls | 161 |
| A.9 | Gegenüberstellung verschiedener Berechnungsmethoden zur Abschätzung des Leckagemassenstroms | 162 |
| A.10 | Flussdiagramm zur Bestimmung der Messgenauigkeit | 163 |
| A.11 | Vergleich zweier stationärer Kennfeldmessungen zur Abschätzung der Wiederholgenauigkeit | 164 |
| A.12 | Vergleich zweier Fünflochsondenmessungen am Rotoraustritt zur Abschätzung der Wiederholgenauigkeit | 164 |
| A.13 | Nachweis der Gaußschen Normalverteilung | 165 |
| A.14 | Schematische Darstellung der Autokorrelationsfunktion | 166 |
| A.15 | Methoden zur Bestimmung des integralen Zeitmaßes | 167 |
| A.16 | Korrekturmethode der Fünflochsondendaten | 168 |
| A.17 | Auswertemethode zur messebenenübergreifenden Berechnung spezifischer Kenngrößen | 169 |

| | | |
|------|--|-----|
| A.18 | Vergleich von Daten aus Messkämmen und Fünflochsondenmessungen | 170 |
| A.19 | Dimensionsloser Wandabstand für das Rechengebiet der OLC-Konfiguration | 171 |
| A.20 | Verlauf der Residuen für Masse-, Impuls- und Energiegleichung sowie Abweichungen des Massenstroms, des Totaldruckverhältnisses und des isentropen Wirkungsgrades | 174 |
| A.21 | Einfluss der Variation des Eintrittsdruckes auf die Kennfelddaten . | 175 |
| A.22 | Einfluss der VIGV-Schaufelwinkelvariation auf die Radialprofile bei Teillastdrehzahl N3 | 176 |
| A.23 | Einfluss der VIGV-Schaufelwinkelvariation auf die zweidimensionalen Totaldruckfelder am Stufenaustritt bei Teillastdrehzahl N3 . . . | 177 |
| A.24 | Gemittelter Wanddruck im Bereich der Rotorblattspitze für die VSV-Variation der OLC-Konfiguration | 178 |
| A.25 | Druckfluktuationen während spezifischen Umdrehungen für die VSV-Variation der OLC-Konfiguration | 179 |
| A.26 | Frequenzspektren aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze bei Vollastdrehzahl N1 – Konfiguration OLC VIGV _{nom} VSV–3,4 | 179 |
| A.27 | Frequenzspektren aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze bei Vollastdrehzahl N1 – Konfiguration OLC VIGV _{nom} VSV+2,6 | 180 |
| A.28 | Bandpass-gefilterte Amplitudenverläufe aus DMS- und WPT-Daten bei Überschreiten der Stabilitätsgrenze für die VSV-Variation der OLC-Konfiguration | 180 |
| A.29 | Blockageeffekt an der Sperrgrenze für REF und OLC | 181 |



Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Einflussgrößen zur Abschätzung der Messgenauigkeit | 51 |
| 3.2 | Abschätzung der Messgenauigkeit | 51 |
| 4.1 | Übersicht der relativen Spalthöhen zur Untersuchung des Leckage- einflusses | 117 |
| A.1 | Zusammenfassung der durchgeführten Messungen | 154 |
| A.2 | Eigenschaften und Kriterien zur Beurteilung des numerischen Re- chengitters | 172 |



Nomenklatur

Lateinische Zeichen

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|---------------|----------------|--------------------------------------|
| a | m/s | Schallgeschwindigkeit |
| A | m ² | Fläche |
| b | m | Spalthöhe |
| c | m/s | Absolutgeschwindigkeit |
| c_{∞} | m/s | Fluggeschwindigkeit |
| C_A | – | Auftriebskoeffizient |
| c_p | J/(kg · K) | Spezifische isobare Wärmekapazität |
| C_p | – | Statischer Druckanstiegskoeffizient |
| C_w | – | Widerstandskoeffizient |
| d | m | Abrückung Stoß – Schaufelvorderkante |
| f | Hz | Frequenz |
| F | – | Flow Function |
| F | N | Kraft |
| h | J/kg | Spezifische Enthalpie |
| h | m | Höhe |
| I_x | s | Integrales Zeitmaß |
| k | J/kg | Turbulente kinetische Energie |
| K | – | Korrekturfaktor |
| m | kg | Masse |
| \dot{m} | kg/s | Massenstrom |
| M | N m | Drehmoment |
| M | – | Anzahl |
| Ma | – | Machzahl |
| N | U/min | Drehzahl |
| N | – | Anzahl |
| p | Pa | Druck |
| P | W | Leistung |
| r | m | Radius |
| R | J/(kg · K) | Spezifische Gaskonstante |

| | | |
|-----------|------------------|-------------------------------|
| Re | – | Reynoldszahl |
| s | $J/(kg \cdot K)$ | Spezifische Entropie |
| s | m | Sehnenlänge |
| S | J/K | Entropie |
| t_{sch} | m | Schaufelteilung |
| t | s | Zeit |
| T | K | Temperatur |
| T | s | Zeitdauer |
| u | m/s | Umfangsgeschwindigkeit |
| w | m/s | Relativgeschwindigkeit |
| w | J/kg | Spezifische Arbeit |
| x | – | Beliebige physikalische Größe |
| y^+ | – | Dimensionsloser Wandabstand |
| Y_p | – | Totaldruckverlustkoeffizient |
| z | m | Flugstrecke |

Griechische Zeichen

| <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|----------------|----------------|--|
| α | ° | Strömungswinkel Absolutgeschwindigkeit in Umfangsrichtung |
| β | ° | Strömungswinkel Relativgeschwindigkeit in Umfangsrichtung |
| β | – | Systematischer Fehler |
| γ | ° | Radialer Strömungswinkel |
| δ | – | Gesamtfehler |
| Δ | – | Differenz |
| ε | – | Zufälliger Fehler |
| ϵ | μE | Dehnung |
| η | – | Wirkungsgrad |
| θ_m | ° | Metallwinkel |
| θ_{sch} | ° | Schaufel-/Staffelungswinkel |
| ϑ | – | Kontraktionszahl |
| κ | – | Isentropenexponent |
| λ | ° | Stoßwinkel |
| μ | – | Erwartungswert, Mittelwert einer Messreihe |

| | | |
|--------------|-------------------|--|
| ξ | – | Verlustkoeffizient |
| π | – | Druckverhältnis |
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| σ | – | Standardabweichung |
| σ | – | Überdeckung (engl. Solidity) |
| ζ | – | Reibungszahl |
| τ | – | Temperaturverhältnis |
| φ | – | Häufigkeitsverteilung |
| ϕ | % | Relative Feuchte |
| Φ | – | Beliebige Strömungsgröße |
| Ψ_{t-s} | – | Total-zu-Statik-Druckanstiegskoeffizient |
| ω | 1/s | Drehfrequenz |
| ω | 1/s | Turbulente Frequenz |

Sub- und Superskripte

| <i>Symbol</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|-------------------|---------------------------------|
| $\bar{\square}$ | Mittelwert |
| $\tilde{\square}$ | Unkorreliert |
| \square' | Grenzschichtbehaftet |
| \square^* | Modifiziert |
| \square^A | Umgebungsbedingungen A |
| \square^B | Umgebungsbedingungen B |
| \square_{03} | Beruhigungskammer |
| \square_{10} | Einlauf, Massenstrommessstrecke |
| \square_{15} | Grenzschichtkamm |
| \square_{20} | Rotoreintritt |
| \square_{21} | Rotoraustritt |
| \square_{30} | Stufenaustritt |
| \square_A | Aerodynamisch |
| \square_{amb} | Umgebung (engl. Ambient) |
| \square_{aus} | Austritt |
| \square_{baro} | Barometrisch |
| \square_B | Brennstoff |
| \square_{dyn} | Dynamisch |
| \square_{eff} | Effektiv |

| | |
|---|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> _{ein} | Eintritt |
| <input type="checkbox"/> _{FZ} | Flugzeug |
| <input type="checkbox"/> _{hub} | Nabe (engl. Hub) |
| <input type="checkbox"/> _i | Inzidenzbehaftet |
| <input type="checkbox"/> _{is} | Isentrop |
| <input type="checkbox"/> _{isa} | ISA-Bedingungen |
| <input type="checkbox"/> _j | Einzelwert, Laufvariable |
| <input type="checkbox"/> _{kav} | Kavität |
| <input type="checkbox"/> _{Leck} | Leckage |
| <input type="checkbox"/> _{red} | Reduzierte Größe |
| <input type="checkbox"/> _{ref} | Referenzgröße |
| <input type="checkbox"/> _{rel} | Bezogene Größe |
| <input type="checkbox"/> _{rot} | Rotor |
| <input type="checkbox"/> _s | Statische Größe |
| <input type="checkbox"/> _s | Strukturell |
| <input type="checkbox"/> _{sch} | Schaufel |
| <input type="checkbox"/> _t | Totalgröße |
| <input type="checkbox"/> _{th} | Thermisch |
| <input type="checkbox"/> _{tip} | Blattspitze (engl. Tip) |
| <input type="checkbox"/> _u | Umfangsrichtung |
| <input type="checkbox"/> _v | Verdichter |
| <input type="checkbox"/> _{var} | Variation |
| <input type="checkbox"/> _w | Wahrer Wert |
| <input type="checkbox"/> _x | Messwert x zugehörig |
| <input type="checkbox"/> _{zelle} | Stallzelle |
| <input type="checkbox"/> _μ | Mittelwert μ zugehörig |

Abkürzungen und Akronyme

| <i>Symbol</i> | <i>Bezeichnung</i> |
|---------------|--|
| 1F | Erste Biegemode (engl. First Flap Mode) |
| 1T | Erste Torsionsmode (engl. First Torsional Mode) |
| 5LS | Fünflochsonde |
| ACARE | Advisory Council for Aeronautic Research in Europe |
| AKF | Autokorrelationsfunktion |
| AP | Auslegungspunkt |

| | |
|--------|--|
| AVDR | Verhältnis der Massenstromdichte (engl. Axial Velocity Density Ratio) |
| avg | Mittelwert (engl. Average) |
| AVR | Axialgeschwindigkeitsverhältnis (engl. Axial Velocity Ratio) |
| ax | Axiale Richtung |
| BLISK | Blade Integrated Disk |
| BP | Betriebspunkt |
| BTC | Blattspitzenspalt (engl. Blade Tip Clearance) |
| CFD | Numerische Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics) |
| DF | Diffusionszahl |
| DH | De Haller-Kriterium |
| DMS | Dehnmessstreifen |
| DMW | Drehmomentenmesswelle |
| DS | Druckseite |
| EO | Erregerordnung (engl. Engine Order) |
| EXP | Experimentell |
| FFT | Schnelle Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier Transformation) |
| FVM | Finite-Volumen-Methode |
| HCF | Ermüdungsbruch (engl. High Cycle Fatigue) |
| HK | Schaufelhinterkante |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| IM | Angedrosselter Betriebspunkt (engl. Intermediate) |
| ISA | Internationale Standardatmosphäre |
| max | Maximum |
| ME | Messeebene |
| min | Minimum |
| N1...5 | Drehzahlen 1 bis 5 |
| NC | Betriebspunkt an Sperrgrenze (engl. Near Choke) |
| ND | Knotendurchmesser (engl. Nodal Diameter) |
| nom | Nominal |
| NS | Letzter stabiler Betriebspunkt (engl. Near Stall) |
| NSV | Nicht-synchrone Schaufelschwingungen (engl. Non-synchronous Blade Vibrations) |
| OLC | Optimierte Verdichterkonfiguration (engl. Optimized Loading Compressor) |
| opt | Optimiert |
| PE | Betriebspunkt besten Wirkungsgrades (engl. Peak Efficiency) |

| | |
|------|---|
| PIV | Particle Image Velocimetry |
| RANS | Reynolds-Averaged-Navier-Stokes |
| REF | Referenzkonfiguration |
| RMS | Quadratischer Mittelwert (engl. Root Mean Square) |
| SFC | Spezifischer Treibstoffverbrauch (engl. Specific Fuel Consumption) |
| SM | Stabilitätsgrenzenabstand (engl. Stability Margin) |
| SS | Saugseite |
| SST | Shear-Stress Transport |
| SVKI | Statorvorderkanteninstrumentierung |
| TRL | Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level) |
| TSV | Transsonischer Verdichterprüfstand |
| umf | Umfangsrichtung |
| VIGV | Variables Eintrittsleitrad (engl. Variable Inlet Guide Vane) |
| VK | Schaufelvorderkante |
| VSV | Variables Leitrad (engl. Variable Stator Vane) |
| WPT | Piezoresistiver Wanddrucksensor (engl. Piezo-resistive Wall Pressure Transducer) |