
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 Beschaufelung 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 Tandemschaufel 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 Nachlaufdehle	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	Messebene
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)