
Untersuchungen zur pulsierenden Prallkühlung im Turbinengehäuse

Christian Scherhag



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Band 10 / 2018

Forschungsberichte aus dem Institut für
Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe

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

Untersuchungen zur pulsierenden Prallkühlung im Turbinengehäuse

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Scherhag

aus Kassel

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand
Tag der Einreichung:	6. November 2017
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Februar 2018

Darmstadt, 2018

Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 10

Christian Scherhag

**Untersuchungen zur pulsierenden Prallkühlung
im Turbinengehäuse**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5913-7

ISSN 2364-4761

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*Bildung ist das, was übrig bleibt,
wenn man alles vergessen hat,
was man gelernt hat.*

WERNER HEISENBERG

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 für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe der Technischen Universität Darmstadt. Auch wenn eine Dissertation gemeinhin als Einzelleistung aufgefasst wird, so tragen in den meisten Fällen viele Personen zum Gelingen bei. An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die mich dabei unterstützt haben, diese Arbeit zu erstellen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer, dem Leiter des Fachgebietes, gilt mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die vielen hilfreichen Anregungen. Ich habe immer den nötigen Rückhalt verspürt und konnte meine Gedanken und Ideen in angenehmer Arbeitsatmosphäre frei entfalten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand, Direktor des Institutes für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt an der Universität Stuttgart, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Den Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet danke ich für die konstruktive und stets freundschaftliche Zusammenarbeit. Die vielen interessanten und häufig amüsanten Gespräche bereicherten den Arbeitsalltag und lieferten nicht selten auch Impulse für meine Arbeit. Ich habe immer viel Hilfsbereitschaft erfahren und bin mit meinen Fragen und Anliegen stets auf offene Ohren gestoßen.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch meinen studentischen Mitarbeitern aussprechen, die durch ihren engagierten Einsatz als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen von Abschlussarbeiten einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich unermüdlich unterstützt haben und ohne die ich mein Studium und meine Dissertation nicht erfolgreich hätte abschließen können. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Christian Scherhag

Mülheim an der Ruhr, März 2018

Kurzfassung

Ein wesentliches Ziel bei der Auslegung der Turbinenkühlung in Flugzeugtriebwerken ist die Erhöhung des Wärmeübergangs. Ein hoher Wärmeübergang begünstigt die Komponentenlebensdauer und eröffnet ein Einsparpotenzial an Kühlluft, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad anheben lässt. Die stationäre Prallkühlung hat sich als ein effizientes Verfahren zur internen Schaufelkühlung und Gehäusekühlung etabliert. Neuere Studien haben gezeigt, dass pulsierende Prallstrahlen den Wärmeübergang gegenüber stationären Prallstrahlen signifikant erhöhen können.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Erkenntnis an eine Anwendung zur Kühlung des Turbinenlinersegments heranzuführen. Daher wurde im Rahmen der Arbeit sowohl eine numerische als auch eine experimentelle Studie durchgeführt, um die Auslegung einer Gehäusekavität zu bewerten, die das periodisch instationäre Druckfeld der Rotorumströmung nutzt um einen Prallstrahl in Pulsation zu versetzen. Durch eine Öffnung zwischen Kavität und Schaufelringraum breitet sich das Druckfeld des Rotors in die Kavität hinein aus und induziert darin ein oszillierendes Druckfeld. Die Ergebnisse der hochaufgelösten instationären Strömungssimulation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten hochfrequenter Druckaufnehmer im Inneren der Kavität sowie der Hitzdrahtanemometrie am Düsenaustritt. Darüber hinaus visualisiert die numerische Strömungssimulation die Bildung deutlich ausgeprägter Ringwirbelstrukturen am Düsenaustritt als Folge der Pulsation. Im Rahmen der Messungen wurde der Einfluss des Betriebspunktes auf die Druckausbreitung innerhalb der Kavität untersucht. Die Abhängigkeit der Druckschwingung von Rotordrehzahl und Stufendruckverhältnis wurde in Übereinstimmung mit einer analytischen Betrachtung beobachtet, die einfachen linear-akustischen Gesetzmäßigkeiten folgt.

Ergänzend durchgeführte Large-Eddy-Simulationen an einem pulsierenden Prallstrahl mit Kanalbegrenzung beschreiben den Zusammenhang zwischen der Pulsationsamplitude, den damit einhergehenden instationären Strömungseffekten und der erreichbaren lokalen Wärmeübergangserhöhung. Bereits bei verhältnismäßig schwachen Pulsationsamplituden lassen sich geordnete und klar voneinander abgegrenzte Ringwirbelstrukturen erkennen. Mit steigender Pulsationsamplitude nimmt die Intensität dieser Strukturen zu und es kommt zu einer Erhöhung des Wärmeübergangs gegenüber der konventionellen Prallströmung. Erst bei sehr hohen Pulsationsamplituden dominieren Mischungeffekte und es kann keine weitere Wärmeübergangserhöhung erreicht werden.

Abstract

Maximizing heat transfer is an important task in jet engine development in order to extend component lifetime or to increase efficiency by reducing cooling mass flow. For some turbine cooling applications, *e.g.* internal blade cooling or liner cooling, jet impingement is well-established as an efficient cooling method. Recent studies have shown that pulsating impinging jets can enhance heat transfer compared to steady jet impingement.

The goal of this research is to transfer these findings to an application for internal cooling of the turbine liner segment. Therefore, a combined numerical and experimental investigation was conducted to evaluate the design of a casing cavity device which utilizes the periodically unsteady pressure distribution caused by the rotor air flow to excite a pulsating impinging jet. Through an opening between the main annulus and a casing cavity pressure pulses propagate into this cavity and cause a strong pressure oscillation inside. The unsteady CFD results were in good agreement with the measurement data obtained using high frequency pressure transducers in the inner cavity and hot wire anemometry at the nozzle exit. Furthermore, the numerical study visualizes the formation of distinct toroidal vortex structures at the nozzle exit as a result of the jet pulsation. Within the scope of the measurements the influence of the operating point on the pressure propagation inside the cavity was investigated. The dependence of shape and amplitude of the pressure oscillation on engine speed and stage pressure ratio was found to be in accordance with an analytical consideration following the principles of linear acoustics.

Additionally performed Large Eddy Simulations of a confined pulsating impinging jet describe the correlation between the pulsation amplitude, the associated unsteady flow phenomena, and the achievable local heat transfer enhancement. Already at comparatively weak pulsation amplitudes distinct toroidal vortex structures can be clearly identified. As the pulsation amplitude increases the intensity of these structures increases as well resulting in an enhancement in heat transfer compared to steady jet impingement. Only at very high pulsation amplitudes mixing effects dominate and no further increase in heat transfer can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XXI
Nomenklatur	XXIII
1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung der Arbeit	3
1.2. Struktur der Arbeit	5
2. Stand der Technik	7
2.1. Kühlung des Turbinenlinersegments	8
2.2. Abgrenzung der Arbeit	9
3. Stand der Forschung	11
3.1. Der konventionelle Prallstrahl	11
3.1.1. Strömungsfeld des konventionellen Prallstrahls	12
3.1.2. Wärmeübergang der konventionellen Prallströmung	14
3.2. Der pulsierende Prallstrahl	18
3.2.1. Verstärkung von Scherschichtinstabilitäten	20
3.2.2. Vollständige Strahlpulsation	23
3.2.3. Ringwirbel und Grenzschichteffekte	26
3.3. Akustik	29
4. Experimenteller Aufbau	35
4.1. Prüfstand und Integration des Kühlkonzeptes	35
4.2. Auslegung der Kavität	38
4.3. Instrumentierung	39
5. Numerische Modellierung	45
5.1. Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik	45
5.2. Turbulenzmodellierung	48
5.2.1. Reynolds-Mittelung	48
5.2.2. Skalenadaptive Simulation	50

5.2.3. Large-Eddy-Simulation	52
5.3. Finite-Volumen-Methode	55
5.4. Modellbildung für die Verdichterstufe und den Gehäuseeinsatz . . .	57
5.4.1. Diskretisierung	58
5.4.2. Randbedingungen	60
5.5. Modellbildung für die Large-Eddy-Simulationen des pulsierenden Prallstrahls	61
5.5.1. Diskretisierung	62
5.5.2. Randbedingungen	63
6. Ergebnisdarstellung und -diskussion	65
6.1. Pulsierender Prallstrahl	65
6.1.1. Validierung der numerischen Simulationsergebnisse	65
6.1.2. Strömungs- und Grenzschichteffekte	69
6.1.3. Einfluss der Pulsationsamplitude auf den Wärmeübergang .	74
6.2. Gehäuseeinsatz am Transsonischen Verdichter	83
6.2.1. Numerische Ergebnisse	84
6.2.2. Experimentelle Ergebnisse	88
6.2.3. Wärmeübergang	94
6.2.4. Parameterstudie	99
6.2.5. Einfluss der Öffnungsgeometrie	105
6.3. Zusammenfassende Bewertung	109
7. Zusammenfassung und Ausblick	113
Literaturverzeichnis	117
A. Anhang	131
A.1. Kalibration	131
A.2. Diskretisierung der numerischen Berechnungsgebiete	132
A.3. Kennlinie der Verdichterstufe „Rotor1-Stator1“	135
A.4. Statischer Druck am Verdichtergehäuse	136
A.5. Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen .	137