Beeinflussung von Sekundärströmungen in gekrümmten Kanälen mittels Plasma-Aktuatoren

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

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Daniela Claudia Klaubert, M.Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Grundmann
Tag der Einreichung:	19.04.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	22.06.2016

Darmstadt 2017
D 17

Forschungsberichte aus dem Institut für Gasturbinen,
Luft- und Raumfahrtantriebe

Band 6

Daniela Claudia Klaubert

Beeinflussung von Sekundärströmungen in gekrümmten Kanälen mittels Plasma-Aktuatoren

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5494-1
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

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 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe und dem Center of Smart Interfaces der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Projektes „AKSA-Aktive Kontrolle von Störungen in der Aerodynamik“ im Luftfahrtforschungsprogramm IV. Dieses wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen 20E1101D) sowie Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer und Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Tropea, die mir diese interessante Stelle geschaffen und mir die Möglichkeit der Promotion gegeben haben.
Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Schiffer danke ich für sein entgegengebrachtes Vertrauen, das mir ein selbstständiges und freies Arbeiten in allen Bereichen ermöglichte sowie seine Unterstützung und Förderung während meiner gesamten Zeit am Fachgebiet Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. S. Grundmann danke ich für sein stetiges Interesse, die fachliche Begleitung meiner Arbeit und die vielen interessanten Diskussionen, die einen großen Beitrag zum Fortgang meiner Arbeit beigetragen haben. Auch für die Übernahme des Koreferats möchte ich herzlich danken.

Ein besonderer Dank geht an meine unermüdlichen Korrekturleser Michael Kloss, Barbara Löhr und Andreas Lerch, die mir jederzeit mit fachlichem Rat und guten Diskussionen zur Seite standen und einen großen Beitrag geleistet haben, dass meine Arbeit in dieser Form fertiggestellt wurde. Ein großer Dank geht auch an Thomas König, der mir bei der Abgabe der Arbeit tatkräftig zur Seite stand und an Lucas Giller, der mich bei der Übernahme seines Prüfstandes unterstützte. Ihnen allen danke ich für ihre Unterstützung und ihre Freundschaft.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet, die mich während meiner Zeit am Fachgebiet begleitet haben, für das angenehme Arbeitsklima sowie ihre Hilfsbereitschaft.

Ein großer Dank geht auch an die Kollegen am Windkanal, die mich vorbehaltlos aufgenommen haben und mir mit Rat zur Seite standen. Ohne sie wäre ein so schneller Aufbau des Wissens über Plasma-Aktuatoren nicht realisierbar gewesen. Ich danke allen Mitarbeitern der Werkstatt des Fachgebiets sowie des Windkanals für die Ratschläge bei der Konstruktion des Prüfstandes sowie dessen Aufbau und die jederzeit erfolgte Hilfe.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Studierenden, die ich während meiner Zeit am Fachgebiet betreuen durfte. Sie haben durch ihren engagierten Einsatz und ihre Arbeiten wertvolle Beiträge geleistet und entscheidend zum Fortschritt dieser Arbeit beigetragen.

Bei dem Industriepartner Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG, vertreten durch Herrn Dr.-Ing. T. Janetzke, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes und die erhaltenen Anregungen bedanken.

Herrn Prof. D. K. Hennecke, Ph.D. danke ich für seine kontinuierliche Unterstützung und die erfrischenden Gespräche.

Der größte Dank geht an meine Familie und Freunde, die mich auf dem ganzen Weg begleitet und unterstützt haben und jederzeit für mich da waren.

Frankfurt, 2017 Daniela Klaubert

Kurzfassung

Um die stetig steigenden Anforderungen an Flugtriebwerke mittelfristig zu erfüllen, sind Forschungen auf neuen, innovativen Gebieten von großem Interesse. Passive Methoden zur Strömungsbeeinflussung, wie z.B. die Endwandkonturierung, haben bereits Einzug in Flugtriebwerke erhalten und dazu beigetragen, den Wirkungsgrad zu verbessern. Der Nachteil dieser Methoden besteht oft darin, dass diese nur in einem schmalen Betriebsbereich nahe des Auslegungspunktes wie gewünscht arbeiten. Deshalb spielt die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Strömung wie die hier untersuchte Methode der *Dielectric Barrier Discharge* Plasma-Aktuatoren eine immer größere Rolle. Durch diese Methode sind Anpassungen an sich ändernde Strömungszustände während des Betriebs möglich.

Der aufgrund des Kräftegleichgewichts in der Grenzschicht einer Umlenkung entstehende Sekundärwirbel, der in einem Triebwerk als Passagenwirbel bezeichnet wird, ist für hohe Strömungsverluste verantwortlich. Durch eine Beeinflussung des Wirbels kann sowohl auf die durch ihn entstehenden Verluste als auch auf seine Interaktion mit der Gesamtströmung Einfluss genommen werden.

Diese Arbeit liefert grundlegende Erkenntnisse des Zusammenwirkens eines Plasma-Aktuators mit den Sekundärströmungen in einem gekrümmten Kanal, die auch im Kontext eines realitätsnahen Anwendungsfalles betrachtet werden. Dabei spielt die Identifizierung von Parametern des Plasma-Aktuators eine entscheidende Rolle.

Hierzu wird die Wirkweise des Plasma-Aktuators bei verschiedenen Ausrichtungen zur Hauptströmung experimentell untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Plasma-Aktuator als Wirbelgenerator fungiert. Dabei haben Änderungen in der Ausrichtung und Leistung einen signifikanten Einfluss auf die Lage und Größe des entstehenden Längswirbels. Zusätzlich führt die endliche Länge des Plasma-Aktuators zu Randeffekten, die in Form von Totaldruckverlustgebieten sichtbar werden.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass Sekundärströmungen in einem gekrümmten Kanal, wie bei einer Umlenkung und in einer Turbinenschaufelpassage, durch den Einsatz eines Plasma-Aktuators stark beeinflusst werden können. Dabei findet die Beeinflussung des Sekundärwirbels durch seine Interaktion mit dem durch den Plasma-Aktuator induzierten Längswirbel statt. Die Positionierung, Ausrichtung und Leistung des Plasma-Aktuators werden dabei als die Parameter mit dem stärksten

Einfluss herausgearbeitet. Die Änderungen in der Sekundärströmung weisen teilweise ein gewinnbringendes Potential für den Einsatz in späteren Anwendungen auf.

Abstract

To meet the continuously increasing requirements on aircraft engines in the medium term, research in new and innovative technologies are of great interest. Passive methods for influencing flow, such as endwall contouring have already found their way into aircraft engines and help improving their efficiency. Often a disadvantage of such methods is that they only work as required in a restricted operating range, which is near the design point. Therefore active methods to influence flow, like the investigated method of *dielectric barrier discharge* plasma actuators, become increasingly important. Through this method, adjustments to variable flow conditions during operation are possible.

Due to the balance of forces in the boundary layer in a curved duct a secondary vortex, called passage vortex in a turbine, is created. This vortex is responsible for high losses in energy. Influencing the vortex can result in reducing these losses and changing the interaction between the vortex structure and the main flow.

This work provides basic knowledge of the interaction of a plasma actuator with secondary flows in a curved duct. This knowledge is also considered in a more realistic context. Therefore identifying parameters of the plasma actuator is essential. The plasma actuator was first experimentally investigated under different orientations to the main flow. The results show that the plasma actuator acts like a vortex generator. The consumed electrical power and the actuator orientation significantly influence the position and strength of the arising longitudinal vortex structure. The finite length of the plasma actuator leads to side effects, in form of total pressure loss regions.

Overall, the study shows that secondary flows in a curved duct, as in a deflection and in a turbine blade passage, can be strongly influenced by the use of a plasma actuator. This influence is caused by an interaction between the secondary vortex and the plasma actuator´s induced longitudinal vortex. The positioning, orientation and power of the plasma actuator significantly affect the flow control´s effectiveness. The observed changes in the secondary flow structures have partially a profitable potential for use in real applications.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur **XI**

Abbildungsverzeichnis **XV**

Tabellenverzeichnis **XXI**

1. Einleitung **1**
1.1. Zielsetzung und Struktur der Arbeit 2

2. Stand der Forschung **5**
2.1. Sekundärströmungen 5
2.2. Dielectric Barrier Discharge Plasma-Aktuator 12

3. Experimentelle Aufbauten **19**
3.1. Der Sekundärströmungskanal 19
3.2. Der Kaskadenprüfstand 24
3.3. Vergleich beider Prüfstände 29
3.4. Der Plasma-Aktuator 29

4. Messverfahren und Versuchsprogramm **35**
4.1. Messverfahren 35
4.1.1. Pneumatische Messverfahren 36
4.1.2. Hitzdrahtanemometrie 41
4.1.3. Farbanstrichverfahren 42
4.1.4. Messtechnik 45
4.2. Versuchsprogramm 46

5. Auswertemethoden **53**
5.1. Identifikation eines Wirbels 53
5.1.1. Wirbelstärke 53
5.1.2. λ_2-Kriterium 54
5.1.3. Wirbelmodelle 55
5.2. Identifikation des Wirbelmittelpunktes 58
5.2.1. Γ_1-Kriterium 58

5.3. Form des Wirbels 59
5.4. Verlustbetrachtung 60
5.4.1. Zirkulation 61
5.4.2. Sekundärkinetische Energie 62
5.4.3. Totaldruckverlustziffer 63
5.5. Bestimmung der Grenzschichtcharakteristik 64
5.6. Fehlerbetrachtung 65

6. Ergebnisse und Diskussion 69
6.1. Grundlegende Erkenntnisse am Sekundärströmungskanal 70
6.1.1. Zuströmbedingungen des Sekundärströmungskanals 70
6.1.2. Die Abströmung des Plasma-Aktuators 75
6.1.3. Das Strömungsfeld des Kanals im Referenzzustand 83
6.1.4. Positionseinfluss des Plasma-Aktuators 90
6.1.5. Einfluss der Ausrichtung des Plasma-Aktuators 100
6.1.6. Leistungseinfluss des Plasma-Aktuators 104
6.1.7. Einfluss der Länge des Plasma-Aktuators 106
6.1.8. Einfluss der Anzahl der Plasma-Aktuatoren 108
6.1.9. Einfluss der Betriebsart des Plasma-Aktuators 109
6.1.10. Vergleich des Plasma-Aktuators mit anderen Methoden 111
6.1.11. Zusammenfassung der Ergebnisse am Sekundärströmungskanal 113
6.2. Erkenntnisse am Kaskadenprüfstand 116
6.2.1. Die Zuströmung in der Kaskade 117
6.2.2. Das Strömungsfeld der Kaskade im Referenzzustand 122
6.2.3. Positions- und Ausrichtungseinfluss der Plasma-Aktuatoren . . 128
6.2.4. Leistungseinfluss der Plasma-Aktuatoren 132
6.2.5. Zusammenfassung der Ergebnisse am Kaskadenprüfstand . . . 133

7. Zusammenfassung 139

8. Ausblick 141

Literaturverzeichnis 145

A. Anhang 157
A.1. Messgenauigkeit der Geräte 157
A.1.1. Messequipment der Druckmessung 157
A.1.2. Messequipment der Temperaturmessung 157
A.1.3. Messequipment der Hitzdraht-Messungen 158
A.2. Koordinaten der Plasma-Aktuator-Positionen 158