

Reduzierung des Strömungswiderstandes durch partielle Gleitoberflächen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Helge Jürgen Koch
aus: Neumünster

eingereicht am: 14.05.2014
mündliche Prüfung am: 31.07.2014

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dragan Kožulović
Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

2014

TU Braunschweig – Niedersächsisches Forschungszentrum für
Luftfahrt

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Forschungsbericht 2014-08

**Reduzierung des Strömungswiderstandes durch partielle
Gleitoberflächen**

Helge Koch

TU Braunschweig - Institut für Strömungsmechanik

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2014

Diese Arbeit erscheint gleichzeitig als von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation.

Herausgeber der NFL Forschungsberichte:
TU Braunschweig - Niedersächsisches Forschungszentrum für Luftfahrt
Hermann-Blenk-Straße 27 . 38108 Braunschweig
Tel: 0531-391-9822 . Fax: 0531-391-9804
Mail: nfl@tu-braunschweig.de
Internet: www.tu-braunschweig.de/nfl

Copyright Titelbild: Helge Koch

Copyright Shaker Verlag 2014
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3103-4
ISSN 0945-2214

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dragan Kožulović für seine Ideen zur partiellen Gleitoberfläche bedanken, auf denen diese Arbeit fußt. Im Folgenden möchte ich mich auch bei meinem Studenten Lennart Rossian bedanken, der seine Arbeitskraft bei der Erzeugung eines Teils der in dieser Arbeit vorgestellten Messdaten eingebracht hat. Des Weiteren danke ich meiner Lebensgefährtin, Stefanie Schulze, meinem Vater, Reimer Koch, und meinen Freunden Kerstin und Björn Hinze für ihre Unterstützung als Korrektoren auf der sprachlichen Ebene. Weiterhin gilt mein Dank meinem Kollegen, Lars Müller, der mir fachliche Anregungen im Rahmen dieser Arbeit geliefert hat.

Zuletzt bleibt mir nur noch mich auch bei allen anderen Kollegen zu bedanken, die mich in meiner Promotionszeit begleitet haben und in den Arbeitspausen dafür gesorgt haben, dass ich eigene fachliche Probleme für einen Moment, manchmal auch durch die Bereitstellung von Keksen, vergessen konnte und so Abstand für neue Lösungsansätze finden konnte.

Allen bereits genannten und auch jenen, die ich möglicherweise vergessen habe, nochmals Danke.

Übersicht

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Idee, eine mitbewegte Wand zur passiven Reduzierung des Strömungswiderstandes einzusetzen. Dieses Konzept kann als „partielle Gleitoberfläche“ bezeichnet werden. Als mitbewegte Wand kommt eine rotierende Scheibe zum Einsatz, welche nur zum Teil der Strömung ausgesetzt ist. Das Funktionsprinzip basiert darauf, dass die mitbewegte Wand durch die Wandschubspannung der Anströmung in Bewegung versetzt wird. Hieraus resultiert eine reduzierte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Anströmung und Wand und damit ein reduzierter Strömungswiderstand.

Das Konzept der mitbewegten Wand wurde bereits häufiger untersucht. Hierbei wurden aber nahezu ausnahmslos aktive, mitbewegte Wände eingesetzt. Das Konzept einer passiv mitbewegten Wand ist bisher kaum untersucht worden und die passiv mitbewegte Wand als rotierende Scheibe auszuführen, stellt eine vollständige Neuerung dar. Um eine Einordnung dieses Konzeptes zu ermöglichen, werden daher in dieser Arbeit auch die wichtigsten anderen Konzepte zur Reduzierung des Strömungswiderstandes vorgestellt.

Der Versuchsaufbau in dieser Arbeit besteht aus einer ebenen Platte, in welche an verschiedenen Positionen drehbar gelagerte Scheiben eingelassen werden können, die nur zum Teil der Plattenüberströmung ausgesetzt sind. Die Variation der Geometrie des Gehäuses, die die Scheiben umschließt, war ein Teil des Untersuchungsumfanges dieser Arbeit.

Es wurden Vermessungen der Grenzschicht durchgeführt, um den Effekt der partiellen Gleitoberfläche auf die Überströmung zu beobachten. Des Weiteren wurden die Drehzahlen der Scheiben erfasst, um Rückschlüsse auf die Reduzierung der Wandschubspannung zu ermöglichen.

Das Konzept der partiellen Gleitoberfläche wurde ebenfalls in dieser Arbeit anhand des beschriebenen Versuchsaufbaus theoretisch betrachtet. Hierbei wurde eine vereinfachte analytische Beschreibung der Scheibendrehung unter Berücksichtigung der wesentlichen wirkenden Drehmomente entwickelt. Des Weiteren wird in dieser Arbeit ein Ansatz vorgestellt, um die Grenzschichtströmung über einer ebenen Platte abzubilden, die von einer rotierenden Scheibe beeinflusst wird.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass das Konzept funktioniert und eine Reduzierung des Strömungswiderstandes mit Hilfe einer passiv rotierenden Scheibe erreicht werden kann. Der Vergleich zwischen den experimentellen und analytischen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung, so dass eine Extrapolation über die experimentelle Datenbasis hinaus mit Hilfe der analytischen Modelle möglich ist.

Abstract

This work deals with the idea to use a passively moving wall for drag reduction. This concept will be called as „partial sliding surface“. A rotating disc is used as a moving wall. The disc is only partly exposed to the flow. The idea is, that the wall shear stress itself acts as the driving momentum for the movement of the wall. Due to this movement the velocity difference between wall and mean flow is reduced. At the same time the drag is also reduced.

The concept of a moving wall was already investigated several times, but almost every investigation on this topic deals with a active driven moving wall. A passively moving wall had not been investigated before and the idea to use a rotating disc as a moving wall is a entirely new concept. Hence, to allow a classification of this concept a summary of all other important methods for drag reduction are discussed in this work.

In the scope of this work, a flat plate was experimentally investigated. The rotating discs are embedded in the surface of the flat plate. The discs are enclosed by housings. Only a part of the disc surface is exposed to the flow. Varying the geometry of the disc housing was one major part of the investigations.

As part of this work, boundary layer measurements were conducted to investigate the effects of the moving wall on the flow over the flat plate. Furthermore, the disc rotating speed was measured. This allows to draw conclusions on the reduction of the wall shear stress over the disc.

Theoretical considerations were done in the scope of this work based on the experimental setup. A simplified analytical description of the disc rotating speed was developed. Furthermore, an analytical description of the influenced boundary layer over the disc and the flat plate is shown in this work.

The results of the experiments show that the investigated concept works to use a rotating disc as a passively moving wall to reduce the drag. The comparison of the experimental data and the analytical solutions show a good agreement. Hence, the analytical descriptions can be used to study the effects of the passively moving wall beyond the experimental data base.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Methoden zur Reduzierung des Reibungswiderstandes in Strömungen	4
2.1	Aktive Methoden	5
2.2	Passive Methoden	11
2.3	Zusammenfassung der Methoden	20
3	Das Konzept der mitbewegten Wand	21
3.1	Strömungsmechanische Grundlagen	21
3.2	Umsetzung des Konzeptes mit aktivem Antrieb	23
3.3	Umsetzung des Konzeptes mit passivem Antrieb	26
3.4	Bisherige theoretische Betrachtungen einer mitbewegten Wand	29
4	Experimenteller Aufbau	31
4.1	Verwendete Windkanalanlagen	31
4.1.1	Kleiner Windkanal Braunschweig (KWB)	31
4.1.2	Großer Gitterwindkanal Braunschweig (GGB)	31
4.2	Versuchsmodell	33
4.2.1	Die ebene Platte	33
4.2.2	Die drehenden Scheiben	36
4.3	Versuchsaufbau und Messtechnik	38
4.3.1	Drehzahlmessungen	38
4.3.2	Druckbasierte Geschwindigkeitsmessungen	40
4.3.3	Ölanstrichbilder	42
5	Theoretische Grundlagen und analytische Modellbildung	44
5.1	Grundlegende Strömungsphänomene im Bereich der Scheibe	44
5.1.1	2D Effekte	44
5.1.2	3D Effekte	46
5.2	Analytische Betrachtung der Spaltströmung	46
5.3	Analytische Betrachtung der Scheibenüberströmung	52
5.4	Analytische Betrachtung der Staffelung der Scheiben	57

6 Experimentelle Ergebnisse	63
6.1 Einfluss von Geometrievariationen auf die Scheibendrehzahl	63
6.1.1 Axiale Position der Scheibe	63
6.1.2 Spalthöhen im Scheibengehäuse	64
6.1.2.1 Symmetrische Spalthöhen	65
6.1.2.2 Asymmetrische Spalthöhen	67
6.1.3 Ausrichtung der Scheibenoberfläche zur Plattenoberfläche und Größe des Öffnungswinkels des Gehäuseausschnitts	68
6.1.4 Staffelungseffekt mehrerer Scheiben	70
6.1.5 Einfluss der Lagerung auf die Scheibendrehzahl	70
6.2 Einfluss der Geometrie auf die Grenzschichtentwicklung im Bereich der Scheibe	71
6.2.1 Einfluss der Spalthöhe auf die Grenzschichtentwicklung hinter der drehenden Scheibe	72
6.2.2 Ausrichtung der Scheibenoberfläche zur Plattenoberfläche	76
6.2.3 Einfluss der axialen Scheibenposition und der Staffelung der Scheiben auf die Grenzschichtentwicklung	79
6.3 Einfluss der nicht konstanten Gleitgeschwindigkeit auf die Grenzschichtentwicklung	82
6.4 Vergleich Experiment und Theorie	87
6.4.1 Allgemeine Betrachtungen	87
6.4.2 Geschwindigkeitsverteilungen in der Grenzschicht	92
6.5 Fehlerbetrachtung	94
 7 Zusammenfassung und Ausblick	 96