

Advancements in the Measurement Regime of the Micro-Pillar Shear-Stress Sensor

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Bernardo Nottebrock

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Schröder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Olivier

Tag der mündlichen Prüfung: 25. März 2015

Berichte aus der Strömungstechnik

Bernardo Nottebrock

**Advancements in the Measurement Regime
of the Micro-Pillar Shear-Stress Sensor**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2015

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3606-0

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

meinen Eltern

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Aerodynamischen Institut der RWTH Aachen entstanden. Daher gilt zu allererst mein Dank dem Institutsleiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder, meinem Doktorvater, der meine Arbeit betreut hat und immer viel Interesse an selbiger gezeigt hat. Für das entgegengebrachte Vertrauen, das nicht immer selbstverständliche Entgegenkommen und die ehrliche Kritik, die die vorliegende Arbeit unter anderem erst ermöglicht haben, möchte ich mich ausdrücklich bedanken. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Olivier, Leiter des Stoßwellenlabors, für die Übernahme des Koreferats. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eike Stumpf danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Des Weiteren danke ich meinen Arbeitskollegen. Während der Jahre am Institut habe ich ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung stets geschätzt und dabei die angenehme Atmosphäre am Institut genossen. Insbesondere möchte ich mich aber bei Franka Schröder, Andreas Henze, Christoph Siewert, Dorothee Roggenkamp, Andrea Winzen, Thomas Soodt und Koen Geurts bedanken. Jeder einzelne hat auf die ein oder andere Art und Weise einen teilweise beträchtlichen Anteil am Gelingen meiner Dissertation. Vielen Dank! Gleiches gilt für Kai Pielhop, Isabella Bücker und Timo van Overbrüggen. Ebenso möchte ich mich stellvertretend für die Werkstatt des Instituts bei Herrn Karl-Heinz Radermacher und Dennis Matysik bedanken. Ein großer Dank geht auch an meine Studenten, die immer eine große Hilfe waren. Dieser gilt insbesondere meinen Hiwis Josef Große Krabbe, Ruud Rademakers und Henrik Schönheit, die sich nichts haben anmerken lassen, wenn ich als letzter immer noch unerschütterlich an das Gelingen der Messungen in letzter Minute glaubte und damit – manchmal auch zu meiner eigenen Überraschung – doch immer recht behalten habe. Außerdem Danke an Christopher Bellieno, Henning Berger, Viola Dehe, Christian Hahn, Daniel Heidrich, Corvin Hurtienne, Lev Liberson, Federico Rafanelli, Dominic Schröder, Marius Wedemeyer, Felix Weiß und Daniel Zirbes.

Des Weiteren gilt mein großer Dank meinen Freunden Maria-Theres Tyra, Sylvia Diaz-Cabrera, Nicolas Elsner, Alexander Timmer, Daniel Spitz und Sebastian Hermeth für die vielen Male, in denen ich wahlweise motiviert oder abgelenkt werden musste und was Euch jedes Mal aufs Neue großartig gelungen ist!

Der größte Dank gilt aber meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mich auf dem langen Weg bis zu dem vorliegenden Ergebnis begleitet und unterstützt haben, wobei sie immer an mich geglaubt haben, auch wenn ich es nicht mehr tat. Herzlichen Dank und ¡muchísimas gracias!

Aachen, im April 2015

Bernardo Nottebrock

Abstract

There is currently no measurement system available which allows the quantitative investigation of the temporally and spatially resolved wall-shear stress distribution. Nevertheless, a detailed knowledge on the dynamic processes of the turbulent structures within the boundary layer and on the momentum exchange in the near-wall flow is crucial for the understanding of turbulence in wall-bounded flows. Since the micro-pillar shear-stress sensor (MPS³) offers the potential to accomplish these requirements, the limits of its measurement regime are further investigated in the present work in order to allow measurements in aerodynamic flows and at higher Reynolds numbers. Based on a detailed analysis of the measuring principle of the sensor, two main objectives arose: the increase of the allowable frequency bandwidth and the increase of the acceptable sensor length. On the one hand, the time scales diverge; on the other hand, the thickness of the viscous sublayer, in which the micro-pillars protrude, diminishes as Reynolds number increases. Spatial resolution is achieved by using LIGA technology for the manufacturing of the molds in which the sensors are cast. This enables the fabrication of large arrays of filigree micro-structures.

The investigation of the dynamic behavior of the sensor yielded an aeroelastic character of the micro-structures. Due to the energy exchange that occurs along the observed resonance, the micro-pillars develop a wake with an energy gap in the spectrum. Hence, the measurement regime of the micro-pillar shear-stress sensor is limited to measurements in which no resonance occurs. Nevertheless, measurements at higher Reynolds number are still feasible since the allowable sensor length was found to be $L_p^+ \approx 8$, i.e., larger than the thickness of the viscous sublayer. Taking into account these findings, the sensor has been applied in a zero-pressure gradient turbulent boundary layer. The measurements confirmed the essential features of the wall-shear stress, in particular the ability of the sensor to measure the footprint of large-scale structures. Additional measurements in an adverse pressure gradient turbulent boundary layer showed that the micro-pillar shear-stress sensor can also be used to measure the wall-shear stress distribution in a decelerated flow.

Zusammenfassung

Für die Untersuchung turbulenter Grenzschichten existiert bisher kein Messsystem, das in der Lage ist, die Wandschubspannungsverteilung quantitativ, flächig und zeitlich hoch aufgelöst zu bestimmen. Allerdings ist eine genaue Kenntnis über die dynamischen Prozesse der turbulenten Strukturen innerhalb der Grenzschicht und über den Impulsaustausch in Wandnähe wesentlich für das Verständnis der Entstehung der Turbulenz in wandgebundenen Scherschichten. Da der Micro-Pillar-Shear-Stress-Sensor MPS³ die Möglichkeit bietet, dieses Ziel zu erreichen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Grenzen seines Einsatzbereiches weiter untersucht, um in aerodynamischen Strömungen und bei höheren Reynoldszahlen messen zu können. Aus einer detaillierten Betrachtung des Messprinzips sind daher eine Erhöhung der zulässigen Frequenzbandweite und der zulässigen Sensorgröße als notwendig erarbeitet worden, da durch die größeren Reynoldszahlen einerseits die Zeitskalen

divergieren und andererseits die Dicke der viskosen Unterschicht, in die die Micro-Pillars ragen, abnimmt. Mit dem LIGA-Verfahren wurde ferner eine Möglichkeit gefunden, großflächige Sensorfelder mit filigranen Strukturen herzustellen, die die flächige Erfassung der Wandschubspannungsverteilung erlauben.

Bei der Untersuchung des Übertragungsverhaltens der Sensoren wurde ein aeroelastisches Verhalten der Strukturen festgestellt. Da durch den mit der entstehenden Resonanz einhergehenden Energieaustausch der Nachlauf der Micro-Pillar beeinflusst wird, ist der Einsatzbereich des Micro-Pillar-Shear-Stress-Sensors auf solche Messungen ohne Resonanz beschränkt. Durch eine Erhöhung der zulässigen Sensorgröße auf $L_p^+ \approx 8$, wodurch die Strukturen aus der viskosen Unterschicht herausragen, ist ein Einsatz bei größeren Reynoldszahlen dennoch möglich. Dies wurde abschließend durch Messungen der Wandschubspannungsverteilung in einer vollturbulenten Grenzschichtströmung ohne Druckgradienten gezeigt. Diese Messungen bestätigten die wesentlichen Merkmale der Wandschubspannung, insbesondere aber die Fähigkeit des Sensors den Abdruck großskaliger Strukturen zu detektieren. Durch eine zusätzliche Messung in einer Strömung mit positivem Druckgradienten wurde ferner die Fähigkeit gezeigt, mit MPS³ auch in verzögerten Strömungen messen zu können.

Contents

Nomenclature	v
1 Introduction	1
1.1 Turbulence	1
1.2 Turbulent Boundary Layer	3
1.3 Wall-Shear Stress Measurement Techniques	8
1.3.1 Direct Measuring Techniques	10
1.3.2 Indirect Measuring Techniques	12
1.3.3 Bio-mimicking Hair Flow Sensors	15
1.4 Outline	16
2 The Micro-Pillar Shear-Stress Sensor MPS³	19
2.1 Measurement Principle	19
2.2 Sensitivity Aspects	21
2.2.1 The Near-Wall Velocity Field	22
2.2.2 Material	26
2.2.3 Optical Setup	27
2.2.4 Image Processing	29
2.2.5 Pressure Sensitivity	32
2.2.6 Induced Lateral Forces	33
2.2.7 Cross-axis Sensitivity	34
2.3 Performance	34
2.3.1 Spatial Resolution	34
2.3.2 Dynamic Response	36
2.4 Manufacturing Process	38
2.4.1 Manufacturing the Casting Mold	39
2.4.2 Casting and Demolding	43
2.5 Error Sources	45
2.6 Static Calibration	46
2.6.1 Experimental Calibration	46
2.6.2 Wall-Shear Stress Estimation through Spatial Two-Point Correlation	50
2.7 Measurement Range of the Micro-Pillar Shear-Stress Sensor MPS ³	52
3 Experimental Setup	55
3.1 Experimental Facility	56

3.2	Validation of the Flow	57
3.2.1	Pressure	57
3.2.2	Flow Properties	59
3.2.3	Wall-Shear Stress	69
3.3	Summary	70
4	Investigation of the Static and Dynamic Response of MPS³	73
4.1	Analysis of the Dynamic Behavior of MPS ³	73
4.1.1	Post-Processing Filter	74
4.1.2	Determination of the Frequency Response	76
4.1.3	Wall-Shear Stress Measurements	81
4.1.4	Aeroelasticity and Wake of the Micro-Pillar Shear-Stress Sensor . . .	92
4.2	Influence of the Sensor Length	95
4.2.1	Experimental Procedure	97
4.2.2	Results	98
4.3	Summary	102
5	Two-Dimensional Wall-Shear Stress-Distribution	105
5.1	Zero-Pressure Gradient Turbulent Boundary Layer	107
5.1.1	Introduction	107
5.1.2	Results	108
5.1.3	Wall-Shear Stress Distribution of a Frequency-Truncated Signal . . .	111
5.2	Adverse-Pressure Gradient Turbulent Boundary Layer	113
5.2.1	Numerical Method and Boundary Conditions	116
5.2.2	Experimental Setup	117
5.2.3	Results	121
5.3	Comparison of APG and ZPG Turbulent Boundary Layer	124
6	Conclusion	125