

Ernst Rolf Alexander Rubbert

Streamline Segment Statistics in a Wavy Turbulent Channel Flow

Streamline Segment Statistics in a Wavy Turbulent Channel Flow

Stromliniensegmentstatistik in einer welligen turbulenten Kanalströmung

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

von

Ernst Rolf Alexander Rubbert

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wolfgang Schröder
Universitätsprofessor Dr. rer. nat. habil. Christian J. Kähler

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Juni 2019

Berichte aus der Strömungstechnik

Ernst Rolf Alexander Rubbert

**Streamline Segment Statistics
in a Wavy Turbulent Channel Flow**

Shaker Verlag
Düren 2019

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, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2019

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 978-3-8440-6841-2

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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

Danksagung

Diese Dissertation ist als Teil des DFG-Projektes "Geometrische Struktur kleinskaliger Turbulenz" am Aerodynamischen Institut der RWTH Aachen entstanden. Daher gilt mein Dank zunächst Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder, Leiter des Aerodynamischen Instituts, für die Betreuung dieser Arbeit. Dabei weiß ich insbesondere das mir gegenüber aufgebrachte Vertrauen und die damit einhergehenden Freiheiten während meiner Arbeit sowie die Unterstützung durch fachliche Diskussionen zu schätzen. Zudem möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Christian Kähler für die Übernahme des Korreferats und bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer, der die Prüfungskommission als Vorsitzender geleitet hat, bedanken. Desweiteren möchte ich mich für die produktive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern vom Institut für technische Verbrennung, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Pitsch und Herrn Fabian Hennig, und vom Lehrstuhl für virtuelle Realität und immersive Visualisierung, Herrn Dr. rer. nat. Bernd Hentschel und Frau Andrea Schnorr, bedanken. Mein besonderer Dank gilt dem bedauerlicherweise bereits verstorbenen Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Norbert Peters als Begründer dieses Forschungsfeldes.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Kollegen am Aerodynamischen Institut bedanken, mit denen mich bei der Arbeit und über die Arbeit hinaus viel verbindet. Speziell richtet sich der Dank an meine heutigen sowie ehemaligen Bürokollegen Kai, Timo, Antje, Pascal und Esther und darüber hinaus an Simon, Felix, Andi, Marian, Dorothee, Wenfeng, Thomas und Franka. Danken möchte ich auch Axel, der einen großen Anteil daran hat, dass ich überhaupt ans Institut gekommen und geblieben bin. Außerdem gilt mein Dank Nick Kapellmann stellvertretend für die Kollegen der Werkstatt, deren Arbeit und Erfahrung essenziell für meine Untersuchungen waren.

Neben meinen Kollegen bedanke ich mich auch bei Hendrick, Johannes, Julius, Malte, Kolja, Jan-Felix, Julian und Thede, die als studentische Hilfskräfte oder Studienarbeiter Anteil an meiner Arbeit haben. Insbesondere möchte ich mich bei Dominic bedanken, der als studentische Hilfskraft beinahe meine gesamte Zeit am Institut begleitet und unterstützt hat.

Zudem gilt mein Dank meinen Freunden Jonas, Kathi, Sandra, Guido, Daniel, Rebecca, Jörg, Marie und der gesamten Familie Stoop, die zu rechter Zeit sowohl für Motivation als auch Ablenkung gesorgt haben.

Nicht zuletzt gebührt besonderer Dank meiner Familie. Meine Mutter Angela, meine Großeltern Marlis und Rolf, und meine Tante Sabine und mein Onkel Rainer sind ein starker Rückhalt, auf den immer Verlass ist.

Abstract

This doctoral thesis is part of a research effort to reduce the complexities of turbulent flows by applying a geometrically unambiguous definition of coherent structures to instantaneous turbulent fields. The presented work and results are embedded in the second phase of a larger collaboration between multiple institutions and funded by the DFG project "Geometric Structure of Small-Scale Turbulence". During the first phase of the project, the flow fields were partitioned into space-filling subvolumes, the dissipation elements, in which a chosen turbulent scalar field is monotonous. The resulting statistics of such dissipation elements were analyzed and a model equation describing the propagation of such statistics was derived for homogeneous turbulence. The objective of the current work is to expand the scope of the method to inhomogeneous flows undergoing various pressure gradients and resulting strains, to compare to the structure behavior in homogeneous turbulence, and to analyze the results. In the current project phase, the closely related streamline segmentation method is applied, which partitions instantaneous streamlines into sections with monotonous velocity distributions.

To obtain suitable data for the streamline segment analysis, a new test section for the Eiffel-type wind tunnel at RWTH Aachen University is designed and constructed, which allows for various wall geometries. Highly localized regions of favorable and adverse pressure gradients are imposed onto the flow by outfitting the channel with a wavy sidewall. Since the turbulence decomposition method relies on the precise knowledge of spatial gradients, it is highly sensitive to measurement noise. To guarantee accurate and meaningful results, the impact of the measurement noise on streamline segment statistics is modeled and suitable countermeasures during the detection process are developed. Consequently, planar and volumetric flow measurements are conducted in various near-wall regions of the channel, compared to numerical results, and analyzed by the streamline segment method. While many typical streamline segment characteristics known from homogeneous turbulence can be recovered, significant effects of the inhomogeneity are observed. One of the most apparent differences is found in the asymmetry between segments with increasing and decreasing velocity in streamwise direction. In homogeneous turbulence, the difference in mean length of these segment types is caused by the inherent kinematics of streamline segments, while this effect is negligible in the presence of mean strain in inhomogeneous flows.

Since the streamline segment statistics do not present an immediate response to mean strains, the mechanisms acting on the statistics are found to act on comparable time scales as the convective fluxes. Therefore, a hysteretic behavior is observed. To gain further insight in the dominant mechanisms in various regions of the flow, the propagation equation for streamline segment statistics is modified to include a concept of locality and applied to numerical data. The novel formulation of the model equation for inhomogeneous flows yields the occurrence rates of the fundamental mechanisms in various locations of the flow.

Übersicht

Die Dissertation gliedert sich in ein Forschungsvorhaben ein, dessen Ziel die Beschreibung turbulenter Strömungen als Zusammenspiel eindeutig definierter Strukturen ist, wodurch eine Reduktion der Komplexität turbulenter Prozesse erreicht werden soll. Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen sind Teil der zweiten Phase des durch die DFG geförderten Paketantrags "Geometrische Struktur kleinskaliger Turbulenz". In der ersten Projektphase wurden turbulente Felder in raumfüllende Teilvolumina, die Dissipationselemente, unterteilt, in denen alle Gradiententrajektorien eines skalaren Feldes zu einem einzigen Paar lokaler Extrema führen. Die statistischen Eigenschaften dieser Elemente wurden detailliert analysiert. Zudem konnte eine Modellgleichung hergeleitet werden, die die Elementstatistik in homogener Turbulenz beschreibt. In dieser Phase wird das Hauptaugenmerk auf die Erweiterung der Methodik auf inhomogene Strömungen unter Einfluss lokaler Druckgradienten und daraus resultierender Spannungen gerichtet. Die ermittelten Struktureigenschaften werden mit Ergebnissen der ersten Projektphase aus homogener Turbulenz verglichen und analysiert. Abweichend von der ersten Antragsphase wird die mit der Dissipationselementmethode verwandten Stromliniensegmentmethode verwendet. Diese teilt instantane Stromlinien in Segmente ein, auf denen die Absolutgeschwindigkeit einen monotonen Verlauf aufweist.

Zur Messung wird eine neue Messstrecke für den Windkanal Eiffeler Bauart am Aerodynamischen Institut der RWTH Aachen entworfen, in der eine sinusförmige Wandkontur lokal positive und negative Druckgradienten in der Strömung erzeugt. Da die Detektion von Stromliniensegmenten die exakte Kenntnis räumlicher Gradienten erfordert, wird sie stark vom Messrauschen beeinflusst. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird der Einfluss des Messrauschens modelliert und nötige Maßnahmen für den Detektionsprozess entwickelt. Die volumetrischen Messungen in verschiedenen, wandnahen Regionen des Kanals werden mit numerischen Ergebnissen verglichen und anhand der Stromliniensegmentierungsmethode analysiert. Einige der aus homogenen Strömungen bekannten Eigenschaften von Stromliniensegmentstatistiken sind auch in inhomogener Turbulenz nachweisbar. Trotzdem hat die Inhomogenität der Strömung einen deutlich Einfluss auf die Stromlinienstatistik. Insbesondere die Asymmetrie zwischen beschleunigenden und verzögernden Segmenten unterliegt diesem Einfluss. Während sie in homogener Turbulenz durch die inhärente Kinematik der Segmente bestimmt ist, wird dieser Einfluss in inhomogener Turbulenz durch die mittlere lokale Beschleunigung dominiert.

Stromliniensegmentstatistiken reagieren nicht unmittelbar auf lokale Spannungen, da die wirkenden Mechanismen auf ähnlichen Zeitskalen wie der Strukturtransport stattfinden, was ein hysteretisches Verhalten hervorruft. Um die Mechanismen in verschiedenen Kanalregionen identifizieren zu können, wird ein Lokalisierungsschema für Stromliniensegmente eingeführt und darauf basierend die Modellgleichung für inhomogene Turbulenz angepasst. Durch die Anwendung der neu formulierten Gleichung auf numerische Daten können die lokalen Häufigkeitsraten der Mechanismen bestimmt werden.

Contents

Abstract	i
Übersicht	iii
Nomenclature	vii
1. Introduction	1
1.1. Fundamentals of Turbulence	4
2. Geometric Structure Decomposition	7
2.1. Properties	9
2.2. Model Function	12
3. Measurement Techniques	19
3.1. Particle-Image Velocimetry	19
3.2. Tomographic PIV	21
4. Experimental Setup and Data Processing	29
4.1. Facility and Setup	29
4.2. Evaluation and Post-Processing	33
4.3. Numerical Data	37
4.4. Validation	39
4.5. Streamline Tracing Algorithm	43
5. Streamline Statistics in Wavy Channel Flow	53
5.1. Cuboid Volume Results	53
5.2. Wall-Normal Expansion Slope Volume Results	62
6. Inhomogeneous Streamline Statistics Propagation	75
6.1. Modification of the Propagation Equation	75
6.2. Application to DNS Results	82
7. Summary and Conclusion	97
A. Tracer Particle Response Behavior	109

B. Parameter Fitting Procedure

115

Nomenclature

Latin symbols:

a	Dissipation element strain
$a_{1,l}$	First jump moment of segment length
$a_{1,\Delta}$	First jump moment of segment velocity difference
$\overline{a_{sl}}$	Mean streamwise acceleration
A	Wave amplitude
b	Channel span
B_{ij}	Structure function tensor
c_s	Parameter to balance small and large scale diffusion
$c_{l,\nu}$	Lengthwise streamline segment diffusion coefficient
$c_{\Delta,\nu}$	Diffusive velocity difference decay coefficient
C_{Δ}	Pressure effect coefficient for segment stretching
D	Scalar diffusion coefficient of Φ
d_p	Particle diameter
E	Energy density
g	Gravitational acceleration
h	Channel half height
I	Light intensity
$k, \vec{k}$	Wavenumber, wave vector
K	Source term in propagation equation
l	Streamline segment/dissipation element length
L	Integral length, domain size
n	Number of grid points
$\vec{n}$	Normal vector
N	Total number
N_s	Source density
P	Probability density
q	Velocity distribution function within a streamline segment
$r, \vec{r}$	Distance, distance vector
R	Residual
R_{ij}	Velocity correlation tensor
s	Grid spacing
s_D	Diffusive propagation velocity of zero gradient surface

Nomenclature

t	Time
$\vec{t}$	Tangential vector
u_{Bulk}	Bulk velocity
u_i	Velocity in Cartesian direction i
u, v, w	Cartesian velocity components
$\vec{v}$	Velocity vector
w	Weighting function
$\vec{x}$	Position vector
Y	Transfer function
x, y, z	Cartesian coordinates

Greek symbols:

$\delta(\cdot)$	Delta function
Δ	Streamline segment inner velocity difference
ϵ	Dissipation rate
θ	Viewing angle
ζ	Streamwise coordinate within a streamline segment
η	Kolmogorov length
λ	Taylor length
λ	Wavelength
λ_c	Cutting rate
Λ_c	Dimensionless cutting rate
Λ_r	Dimensionless reattachment rate
μ	Dynamic viscosity
μ_r	Reattachment rate
ν	Kinematic viscosity
ξ	Close proximity range
ρ	Density
σ	RMS of streamline segment inner velocity differences
τ	Dimensionless time
Φ	Base scalar for the construction of dissipation elements
ω	Relaxation parameter
ω	Angular frequency
Ω	Domain

Calligraphical symbols:

$\mathcal{F}(\cdot)$	Fourier transformation
$\mathcal{L}$	Characteristic length
$\mathcal{U}$	Characteristic velocity

Subscripts:

$(\cdot)_{\infty}$	Reference far-field state
$(\cdot)_a$	Refers to associated node
$(\cdot)_c$	Cutting event
$(\cdot)_i$	Quantity that corresponds to Cartesian coordinate direction i
$(\cdot)_m$	Mean quantity
$(\cdot)_{\text{rms}}$	Root mean square of a quantity
$(\cdot)_{\text{sl}}$	In streamwise direction

Operators and Notations:

∇	Nabla operator
$\langle \cdot \rangle$	Averaging operator
$(\cdot)'$	Deviation of a quantity from its mean value $\langle (\cdot) \rangle$
d/dq	Total derivative with respect to q
$\partial/\partial q$	Partial derivative with respect to q
$\text{sgn}(\cdot)$	Signum of a quantity
$(\cdot)$	Dimensionless quantity
$\ \cdot \ $	Euclidean norm
$\overline{(\cdot)}$	Time-averaged quantity
$\hat{(\cdot)}$	Magnitude of a function

Dimensionless numbers:

Re	Reynolds number
St	Stokes number

Abbreviations:

2D	Two-dimensional
3D	Three-dimensional
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary-symmetry metal-oxide semiconductor
DE	Dissipation element
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DNS	Direct numerical simulation
FFT	Fast Fourier transform
GC	Generation via cutting event
GPU	Graphics processing unit
GR	Generation via reattachment event
HPC	High-performance computing
jPDF	Joint probability density function
LED	Light-Emitting Diode
LES	Large-Eddy Simulation
mPDF	Marginal probability density function
MART	Multiplicative algebraic reconstruction technique
Nd:YAG	Neodym-doped yttrium aluminum garnet ($\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
PIV	Particle-image velocimetry
PTV	Particle-tracking velocimetry
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
RC	Removal via cutting event
RR	Removal via reattachment event
SEM	Spectral element method
SLS	Streamline segment
TPIV	Tomographic particle-image velocimetry