

Daniel Gloss

**Der Einfluss von Wandrauheiten
auf laminare Strömungen:
Untersuchungen in Mikrokanälen**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Der Einfluss von Wandrauheiten auf laminare Strömungen: Untersuchungen in Mikrokanälen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Daniel Gloss

aus

Belzig

2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2009

978-3-86727-962-8

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Peters (Ruhr-Universität Bochum)
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2009

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2009

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-962-8

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermofluidodynamik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

An dieser Stelle möchte ich mich vor allem bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig bedanken, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben und mit Geduld, Kompetenz und unzähligen Stunden der intensiven fachlichen Diskussion maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Peters danke ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff für die Bereitschaft den Prüfungsvorsitz zu übernehmen.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Kollegen, die durch den freundschaftlichen Umgang miteinander und die angenehme Zusammenarbeit eine einmalige Atmosphäre am Institut geschaffen haben. Insbesondere danke ich: Andreas Moschallski für sein thermodynamisches Verständnis und seinen Durchblick, Wilson Casas dafür, dass er ein System hinterlassen hat, das zu administrieren beinahe Spaß gemacht hat, Georg Middelberg und Petar Kiš für die strömungsmechanischen Diskussionen und ihre Geduld als Bürokollegen, Karin Dietl für ihre Zielstrebigkeit, Andreas Joos für seine analytische Denkweise, Jens Vassel für die Ruhe, die er auch in schwierigen Situationen ausgestrahlt hat, Prof. Schmitz für seine unkomplizierte Art, Imke Krüger und Katrin Pröbß für ihre vielen unterschiedlichen Blickwinkel des Lebens, Sid Becker für die Gespräche die wir geführt haben, Ekkehart Lohse für seine positive Lebenseinstellung und Jan Wrobel für seine nicht totzukriegende Fröhlichkeit.

Großen Dank schulde ich auch den Studierenden, die im Rahmen von Studien-, Projekt- und Diplomarbeiten an der theoretischen und praktischen Umsetzung des Projektes beteiligt waren. Dafür möchte ich besonders Enno von Aswege, Malte Gehlken, Ina Köcke und Bastian Schmandt danken.

Frau Dorit Moldenhauer danke ich für die Unterstützung in behördlichen Vorgängen und den Technikern Wolfgang Borelius, Wolfgang Michelson und Jörg Scheel für die Unterstützung bei der Fertigung des Versuchsstandes. In diesem Zusammenhang möchte ich mich speziell bei Werner Thun und Kay Sellenschloh bedanken, die mir vorbehaltlos und auf kurzem Dienstweg in entscheidenden Phasen meiner Arbeit sehr geholfen haben.

Ein besonderer Dank gilt Oliver Hausner dafür, dass er mit seiner Arbeit den Weg für meine Promotion geebnet hat, Jan Dittmer für eine entscheidende Idee und unzählige E-Mails, Marc Hölling für seine Unterstützung in allen Bereichen und seinen einzigartigen Humor und Tammo Wenterodt, ohne den diese Arbeit nur halb so gut wäre, für seine Sicht der Dinge, unsere produktive Zusammenarbeit und die positive Energie im Büro.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mich in meiner Arbeit immer bestärkt und nach Kräften unterstützt haben und für die Möglichkeiten, die sich mir dadurch eröffnen.

Mein unendlicher Dank gilt jedoch meiner Ehefrau Simone, für ihre bedingungslose Liebe, ihr Vertrauen, ihre Geduld und ihre niemals endende Zuversicht. Ohne sie wäre ich nicht so weit gekommen.

Hamburg im Mai 2009

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Ausgangspunkt, Konzept und Zielsetzung	3
2.1 Rauheitseinfluss in laminaren Strömungen	3
2.2 Konzept des Versuchsstandes	5
2.3 Ziel der Arbeit	7
3 Theoretische Grundlagen	9
3.1 Thermodynamische Grundlagen	9
3.1.1 Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	9
3.1.2 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	10
3.2 Strömungsmechanische Grundlagen	12
3.2.1 Vorüberlegungen	13
3.2.2 Die Navier–Stokes-Gleichungen	16
3.2.3 Der hydraulische Durchmesser	17
3.2.4 Der ebene Kanal	18
3.3 Analytische Betrachtung der rs-Strömung	20
3.3.1 Herleitung mit der erweiterten Bernoulli-Gleichung	20
3.3.2 Analytische Betrachtung nach Savage	23
3.4 Entropieproduktion in Strömungen (Dissipationsmodell)	24
3.4.1 Entropieproduktion im ebenen Kanal	26
3.4.2 Poiseuille-Zahl der radialsymmetrischen Strömung	27
3.5 Oberflächenrauheit	28
3.5.1 Technische Rauheit	29
3.5.2 Nikuradses Sandrauheitskonzept	30
3.5.3 Herausforderungen bei der Modellierung von Rauheiten	32
4 Versuchsstand	33
4.1 Funktionsweise	33
4.1.1 Spezifikation des Versuchsstandes	34
4.1.2 Abmessungen des Kanals	35
4.2 Fertigung	36
4.2.1 Fertigung der Kreisplatten	37
4.2.2 Fertigung der Wafer	39
4.3 Charakterisierung der radialsymmetrischen Strömung	42
4.3.1 Ist die Strömung stationär?	42
4.3.2 Ist die Strömung laminar/turbulent?	42
4.3.3 Ist die Strömung näherungsweise als inkompressibel zu betrachten?	42
4.3.4 Ist die Kontinuumstheorie anwendbar?	43
4.3.5 Ist die Strömung ausgebildet?	44
4.3.6 Verändern sich Form und Lage der Kreisplatten?	44

4.3.7	Existiert ein Temperatureinfluss?	46
4.3.8	Existiert ein Druckeinfluss?	46
4.3.9	Wie groß ist der Minimaldruck?	47
4.3.10	Wie sieht der Druckverlauf im Kanal aus?	47
4.3.11	Zusammenfassung der Einflussgrößen	47
4.4	Versuchsdurchführung	48
4.4.1	Einstellen der Kanalhöhe	49
4.4.2	Einstellen des Massenstroms	50
4.4.3	Temperaturmessung	50
4.4.4	Druckmessung	51
4.4.5	Verwendung der Siliziumwafer	51
4.4.6	Messdatenerfassung	52
4.4.7	Versuchsauswertung	52
4.5	Vorteile des Versuchsstandes	54
5	Dissipationsmodell	57
5.1	Die Simulationssoftware Fluent	57
5.2	Überlegungen zum Dissipationsmodell	58
5.2.1	Arten von Rauheit	58
5.2.2	Wo liegt die Wand?	59
5.2.3	Definition von D_h^* für raue Kanäle	61
5.2.4	Definition eines Rauheitskennwerts	62
5.3	Der Einfluss von Wandrauheiten	63
5.3.1	Wandrauheiten im ebenen Kanal	63
5.3.2	Wandrauheiten in der Kreisplattenströmung	69
6	Messergebnisse und Modellvalidierung	77
6.1	Messfehler	78
6.2	Messungen zum Rauheitseinfluss	79
6.3	Validierung des Dissipationsmodells	80
7	Mögliche Mikroeffekte	85
7.1	Luft als Fluid	85
7.2	Helium als Fluid	88
7.3	Überlegungen zu Skalierungseffekten	93
8	Fehleranalyse	97
8.1	Messfehler der Sensoren	97
8.2	Zufällige Fehler	98
8.3	Überprüfung des Messaufbaus	98
8.4	Parallelität	100
8.5	Beeinflussung durch die Messbohrungen	100
8.6	Beeinflussung durch den Wafer	102
8.7	Oberflächenprofil der Kreisplatten	103
8.8	Unterschiede der Simulationssoftware	104
9	Diskussion der Ergebnisse	107
9.1	Rauheitseffekte	107
9.2	Mikroeffekte	110
10	Zusammenfassung	113

Literaturverzeichnis	115
Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	123

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A^*	Querschnittsfläche	m^2
B^*	Breite	m
C	Konstante	-
D_h^*	hydraulischer Durchmesser	m
D_h^{e*}	äquivalenter hydraulischer Durchmesser	m
D^*	Durchmesser (z.B. Rohrdurchmesser)	m
E^*	Elastizitätsmodul	N/m^2
E_{kin}^*	kinetische Energie	J
E_{pot}^*	potenzielle Energie	J
f^*	Durchbiegung	m
g^*	Erdbeschleunigung	m/s^2
H_K^*	Abstand der Kanalwände	m
H^*	halbe Kanalhöhe	m
h^*	Höhe	m
k^*	Rauheitsparameter	m
L_c^*	charakteristische Länge	m
L^*	Lauflänge	m
L_{hyd}^*	hydrodynamische Einlaufänge	m
\dot{m}^*	Massenstrom	kg/s
m^*	Masse	kg
P^*	Leistung	W
p^*	Druck	Pa
\dot{Q}^*	Wärmestrom	W
Q^*	Wärme	J
R^*	Radius	m
R^*	ideale Gaskonstante	$\text{J}/\text{kg K}$
r^*	radiale Koordinate	m
R_a^*	arithmetischer Mittelrauwert	μm
R_m^*	maximale Profiltiefe	μm
R_p^*	maximale Profilkuppenhöhe	μm
R_y^*	maximale Profilhöhe	μm
R_z^*	mittlere maximale Profilhöhe	μm
\dot{S}^*	Entropieproduktion	W/K
s^*	spezifische Entropie	$\text{J}/\text{kg K}$
T_U^*	Umgebungstemperatur	K
T^*	Temperatur	K
u_m^*	mittlere Geschwindigkeit in x -Richtung	m/s
U^*	Umfang	m
U^*	innere Energie	J
u^*	Geschwindigkeit in x -Richtung	m/s

\dot{V}^*	Volumenstrom	m^3/s
V^*	Volumen	m^3
v^*	Geschwindigkeit in y -Richtung	m/s
W^*	Arbeit	J
w^*	Geschwindigkeit in z -Richtung	m/s

Griechische Buchstaben

α	Energiebeiwert	-
η^*	dynamische Viskosität	$\text{kg}/\text{m s}$
κ	Isentropenexponent	-
λ^*	mittlere freie Weglänge eines Moleküls	m
ν^*	kinematische Viskosität	m^2/s
φ^*	spezifische Dissipation	m^2/s^2
ϱ^*	Dichte	kg/m^3
τ^*	Zeit	s
τ_w^*	Wandschubspannung	N/m^2

Dimensionslose Größen

K	relative Rauheit
Kn	Knudsenzahl
Λ	Druckzahl
λ_R	Reibungszahl (auch Rohrreibungszahl)
Ma	Mach-Zahl
Po	Poiseuille-Zahl
Re	Reynoldszahl

Indizes

*	dimensionsbehaftete Größe
A	Austritt
a	außen
D	Dissipation
Dh	bezogen auf den hydraulischen Durchmesser
E	Eintritt
gl	global
i	innen
ipol	interpoliert
irr	irreversibel
krit	kritisch
m	mittlerer Wert
max	Maximalwert
mess	gemessen
min	Minimalwert
rev	reversibel
rs	radialsymmetrisch
SG	Systemgrenze
sim	simuliert

1 Einleitung

„Im ersten Bereich für kleine Reynoldssche Zahlen hat die Rauigkeit keinen Einfluß auf den Widerstand. . . “ (Nikuradse 1933)

Diese mittlerweile über 75 Jahre alte Behauptung von Johann Nikuradse ist wissenschaftlich durchaus breit akzeptiert und wird auch heute noch in vielen Publikationen meist vorbehaltlos zitiert. Der Grund für die Konsequenz, mit der die Aussage immer wieder zitiert wird, ist vor allem darin zu suchen, dass laminare Strömungen in technischen Anwendungen bis vor einigen Jahren, wenn überhaupt, eine untergeordnete Rolle spielten. Industriell relevante Strömungen sind fast ausschließlich turbulent.

In den letzten zwei Jahrzehnten ist jedoch ein klarer Trend in der wissenschaftlichen Forschung hin zu immer kleineren Kanälen erkennbar. Waren früher vor allem Kanäle und Rohre zum Transport großer Mengen von Fluiden interessant, so sind es heute Anwendungen wie Mikroprozessorkühlungen oder „Lab-on-a-chip“, die im Mittelpunkt des industriellen Interesses stehen. Hierbei werden mittlerweile Kanäle mit charakteristischen Längen unter 100 μm eingesetzt (Mikrokanäle).

Der Trend zur Miniaturisierung bringt zwei wesentliche Effekte mit sich: Zum Einen sind Strömungen in solchen Kanälen aufgrund der kleinen Abmessungen fast immer laminar ($Re \rightarrow 0$). Zum Anderen hat die Beschaffenheit der Kanalwände eine wesentlich größere Bedeutung, da hier relative Rauigkeiten größere Werte annehmen können als bei Strömungen in „Makrokanälen“. Es wäre deshalb denkbar, dass diese Rauigkeiten auch einen größeren (oder unter Berücksichtigung des oben angegebenen Zitates von *Nikuradse* überhaupt einen) Einfluss auf die Strömung haben.

Die Tatsache, dass dieser Einfluss nicht quantifiziert werden kann und der Umstand, dass Strömungen in kleinen Kanälen (nachfolgend als „Mikrokanalströmungen“ bezeichnet) noch unzureichend untersucht wurden, führte in den letzten Jahren international zu intensiven Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet.

Dabei lässt sich der Kern dieser Forschungen auf eine simple Frage reduzieren: „Verhalten sich Mikrokanalströmungen im Vergleich zu Strömungen in Makrokanälen anders, oder ist in Mikrokanälen lediglich alles kleiner?“ Es wird also prinzipiell in Frage gestellt, ob die physikalischen Gesetze der Strömungen in Makrokanälen auch in Mikrokanalströmungen uneingeschränkt gelten.

Neben der generellen Erforschung des Verhaltens solcher Strömungen ist dabei häufig der Einfluss der Wände bzw. Wandrauigkeiten ein zentrales Thema der Forschungsarbeiten im Bereich der Mikrokanäle. Abweichungen der Ergebnisse im Vergleich zur makroskopischen Theorie werden nicht selten damit erklärt, dass die Rohr- bzw. Kanalwände und deren Beschaffenheit einen entscheidenden Einfluss auf die Strömung haben.

In diesem Zusammenhang stellt sich jedoch eine weitere Frage: „Ist der Einfluss von Rauigkeiten, auf den oft verwiesen wird, in Mikrokanälen anderer Natur als in Makrokanälen?“

Wenn dem so wäre, dann müsste der Rauigkeitseinfluss ein Mikroeffekt sein und dürfte nur in Strömungen in sehr kleinen Kanälen messbar sein. Ist dem nicht so, dann muss der Rauigkeitseinfluss sowohl in Mikro- als auch in Makrokanälen herrschen. In diesem Fall würde die Rauigkeit die Mikrokanalströmung lediglich deshalb stärker beeinflussen, weil andere Randbedingungen (wie z.B. größere relative Rauigkeiten) vorliegen. Dann wäre der Einfluss von Wandrauigkeiten kein Mikroeffekt sondern ein Effekt, der bei allen Strömungen (Makro und Mikro) auftritt, jedoch

in Mikrokanälen, im Gegensatz zu Makrokanälen, nicht vernachlässigt werden darf. Sollte es jedoch zutreffen, dass dieser Effekt in beiden Strömungssituationen auftritt, müsste er auch in Makrokanälen nachweisbar sein.

Aufgrund dieser Fragestellungen liegt es nahe, den Einfluss von Wandrauheiten zunächst im Allgemeinen näher zu untersuchen. Hierbei sollte zunächst geklärt werden, ob der Einfluss von Wandrauheiten in Makrokanälen wirklich nicht existiert und demnach für Makrokanalströmungen immer vernachlässigt werden kann. Solche Untersuchungen sollten experimentell unterstützt werden, um existierende theoretische Modelle validieren zu können. Ein Versuchsstand, an dem solche Experimente durchgeführt werden, sollte es idealerweise ermöglichen, sowohl bekannte Strömungen (glatt) als auch solche, deren Verhalten unbekannt ist (rau) zu untersuchen.

Der Versuch, diese Anforderungen in einem Versuchsstand zu realisieren, wurde im Rahmen eines Promotionsprojektes an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Institut für Thermofluidodynamik unternommen. Dabei stand die Frage nach dem Einfluss von Rauheiten auf laminare Strömungen im Vordergrund. Weiterhin sollte es derselbe Versuchsstand ermöglichen, auch Mikrokanalströmungen experimentell zu untersuchen, um mithilfe der Ergebnisse makroskopischer Strömungssituationen die Ergebnisse in Mikrokanälen genauer deuten zu können.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, den Einfluss von Rauheiten auf laminare Strömungen ganz allgemein zu untersuchen. Dies geschieht besonders im Hinblick auf die Relevanz dieser Ergebnisse für die Forschung an Strömungen in Mikrokanälen.

Für die experimentelle Untersuchung wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Versuchsstand konzipiert und gebaut. Für die Erstellung numerischer Modelle und deren Berechnung wurde kommerzielle CFD-Software verwendet.

2 Ausgangspunkt, Konzept und Zielsetzung

In diesem Kapitel sollen der wissenschaftliche Ausgangspunkt, die Grundidee des Versuchsstandes und die daraus resultierenden Ziele der Arbeit erörtert werden.

Abschnitt 2.1 gibt zunächst einen Einblick in den Stand der internationalen Forschung. Weil laminare Strömungen jedoch fast ausschließlich im Zusammenhang mit der Forschung an Mikrokanalströmungen untersucht werden, liegt der Schwerpunkt der zitierten Quellen auf der Erforschung von Strömungen in Mikrokanälen. Wie bereits einleitend beschrieben, ist dieser Forschungszweig jedoch ebenfalls von Interesse für die vorliegende Arbeit.

Abschnitt 2.2 beschreibt das Grundkonzept des Versuchsstandes und gibt einen Einblick in seine grundsätzliche Funktionsweise. Es soll dabei vor allem die systematische Herangehensweise dieser Arbeit an das Problem der Erforschung des Rauheitseinflusses in laminaren Strömungen erläutert werden.

In Abschnitt 2.3 werden Ziele der Arbeit beschrieben und verdeutlicht, welche Zusammenhänge untersucht werden sollen.

2.1 Rauheitseinfluss in laminaren Strömungen

Wie einleitend erwähnt, ist die Aussage, relative Rauheiten kleiner als 5% hätten keine Auswirkungen auf laminare Strömungen von Nikuradse (1933) bereits über 75 Jahre alt. Allerdings lag der Fokus von Nikurades Untersuchungen auf turbulenten Strömungen in rauen Rohren. Ergebnisse bezüglich laminarer Strömungen waren eher ein Nebenprodukt seiner Arbeit. Darüber hinaus waren die Genauigkeiten der Fertigung und der Messungen im Jahr 1933 wesentlich geringer als dies heute der Fall ist. Trotzdem wird das Ergebnis, laminare Strömungen würden von Wandrauheiten nicht beeinflusst, weithin akzeptiert.

Ansätze, welche die Richtigkeit von Nikurades Erkenntnissen bezüglich des Einflusses von Wandrauheiten in laminaren Strömungen anzweifeln, liefert z.B. Kandlikar (2005). Der Grund für Nikurades möglicherweise fehlerhaften Ergebnisse ist vor allem in Problemen mit der Genauigkeit der verwendeten Messinstrumente zu suchen.

Das Verhalten von laminaren Strömungen in rauen Rohren und Kanälen wird jedoch in zunehmendem Maße kontrovers diskutiert. Wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet wurden in den letzten Jahren vor allem im Zusammenhang mit Strömungen in Mikrokanälen vorangetrieben.

Sowohl experimentelle als auch analytische Untersuchungen zu diesem Thema fördern unterschiedliche Erkenntnisse über Abweichungen zu Strömungen in glatten Kanälen zu Tage und werden nicht selten als „Mikroeffekt“ bezeichnet. Die Aussagen hierzu sind jedoch teilweise sehr unterschiedlich und nicht frei von Widersprüchen.

Häufig werden die untersuchten Kanäle in einem chemischen Ätzverfahren hergestellt, bei dem kleine Kanäle z.B. in Silizium geätzt werden. Dieses chemische Ätzen (*Deep Reactive Ion Etching*) wurde bereits in den 1980er Jahren entwickelt und wird seit einigen Jahren auch für die Herstellung von Mikrokanälen eingesetzt (Phahler u. a. 1990; Shih u. a. 1996; Harms u. a. 1999).