

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).

Das Verfahren ermöglicht die Herstellung verschiedener Formen von Mikrokanälen mit unterschiedlichen Verhältnissen von Kanalhöhe zu -breite, wie z.B. in Barillaro u. a. (2007) und Arnold u. a. (2008) beschrieben. Problematisch ist jedoch die für dieses Verfahren charakteristische Struktur an den Rändern in Ätzrichtung. Hier entstehen keine glatten Kanten, sondern relativ regelmäßige Strukturen, die unter Umständen die Strömung beeinflussen. Auch verbesserte Ätzverfahren beseitigen dieses Problem nicht vollständig, wie James u. a. (2006) zeigen.

Andere Untersuchungen zu laminaren Strömungen in Mikrokanälen werden an Kapillarröhren aus Siliziumoxid (fused-silica-tubes) durchgeführt. Diese haben runde Querschnitte und können mit Durchmessern von $D^* < 10 \mu\text{m}$ hergestellt werden. Auch das Herstellungsverfahren von Kapillarröhren wird bereits einige Jahre eingesetzt (Mala u. Li 1998; Judy u. a. 2002; Brutin u. Tadrist 2003). Nach der Herstellung weisen die Rohrwände solcher Kapillarröhren zwar keine charakteristischen Rauheiten auf, aber auch hier sind die Wände nicht frei von Unebenheiten, wie Judy u. a. (2002) und Tang u. a. (2007) zeigen.

Die Herstellung von glatten Wänden in kleinen Kanälen ist also trotz fortschrittlicher Technologie immer noch problematisch. Auch die Seitenverhältnisse der Kanäle (Kanalhöhe zu -breite) haben einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Strömung, wie Wibel u. Ehrhard (2006) untersucht haben. Ideale ebene Kanäle, also unendlich ausgedehnte Kanäle ohne seitliche Begrenzungen, sind lediglich Modellvorstellungen und werden deshalb nur in theoretischen Arbeiten (z.B. Wenterodt 2007) untersucht. Für den ebenen Kanal ist das Seitenverhältnis (Höhe zu Breite) null.

Seit einigen Jahren wird zusätzlich zu existierenden Verfahren die „Particle Image Velocimetry“ (PIV) zur intensiven Erforschung von Strömungen eingesetzt. Im Bereich von Mikrokanalströmungen werden spezielle μ -PIV-Anlagen verwendet, welche in der Lage sind, Geschwindigkeitsfelder in Mikrokanälen genau zu bestimmen, (vgl. Meinhart u. a. 1999; Klank u. a. 2002; Natraran u. Christensen 2007). Hierfür müssen die untersuchten Kanäle jedoch optisch zugänglich sein, was Materialauswahl und Geometrie der Kanäle wiederum einschränkt.

Wie bereits beschrieben, konzentrieren sich die Forschungsbemühungen im Bereich der Mikrokanalströmungen im Wesentlichen auf laminare Strömungen. Es gibt jedoch auch Anstrengungen, turbulente Strömungen in sehr kleinen Kanälen zu untersuchen, wie Wibel u. Ehrhard (2007) und Kandlikar u. a. (2005) zeigen. Hier sind die Ergebnisse mitunter durchaus widersprüchlich, was die kritische Reynoldszahl und den Rauheitseinfluss angeht.

Für turbulente Strömungen in Makrokanälen hingegen existieren viele detaillierte Untersuchungen, angefangen von Nikuradse (1933), über Colebrook (1939) bis hin zu neueren Veröffentlichungen wie Perry u. a. (1968) und Wosnik u. a. (2000). Vergleiche der Ergebnisse von Mikrokanalströmungen mit makroskopischen Resultaten sind demnach für turbulente Strömungen problemlos möglich. Für laminare Strömungen in Makrokanälen findet sich jedoch kaum neue Literatur.

Wärmeübertragung (z.B. in Mikroprozessoren) ist eines der wichtigsten Forschungsgebiete in der Mikrosystemtechnik und vor dem Hintergrund immer kleiner werdender Architekturen von Mikroprozessoren von besonders großem Interesse. Deshalb gilt der Erforschung der Vorgänge und Besonderheiten von Wärmeübertragung in Mikrokanälen besondere Aufmerksamkeit (Maynes u. Webb 2004; Shokouhmand u. a. 2008; Liu u. a. 2007).

Obwohl das Thema Wärmeübertragung in dieser Arbeit nicht behandelt wird, soll der Vollständigkeit halber erwähnt werden, dass auf diesem Gebiet ebenfalls intensiv geforscht wird. Arbeiten wie Croce u. D'Agaro (2005) stoßen jedoch immer wieder darauf, dass die Strömungssituation und damit das Verhalten der Strömung im Mikrokanal wesentlich stärker von der Wandrauheit beeinflusst wird als die Wärmeübertragung. Dies führt ebenfalls zu der Erkenntnis, dass zuerst Rauheitseffekte klar quantifiziert werden müssen, bevor qualifizierte Aussagen zu Mikroeffekten überhaupt möglich sind. Hierfür ist wiederum die Erforschung des Rauheitseffektes im Allgemeinen von entscheidender Bedeutung.

Aufgrund des ungeklärten Einflusses der Wandrauheit auf laminare Strömungen hat in letzter Zeit ein großer Teil der Wissenschaftler, die sich mit Mikrokanälen beschäftigen, ein steigendes Interesse an der Erforschung von Rauheitseffekten in Mikrokanälen. Hier werden unterschiedliche Herangehensweisen gewählt, um das Problem der rauen Kanalwände zu untersuchen. Es gibt analytische Ansätze, z.B. von Kleinstreuer u. Koo (2004), die eine raue Wand aus einer Schicht eines porösen Mediums modellieren oder von Wang u. a. (2005), die den Einfluss von bandartigen Strukturen auf Strömungen in Mikrokanälen untersuchen.

Des Weiteren werden vermehrt „Computational Fluid Dynamics“ (CFD), also Simulationsprogramme, verwendet, um den Einfluss von Rauheit in Mikrokanälen zu untersuchen. Diese Programme haben sich in den letzten Jahren in ihrer Leistungsfähigkeit (zusammen mit der gestiegenen CPU-Leistung von Computern) zu einem wichtigen Werkzeug in der Erforschung von Strömungen entwickelt.

So untersuchen Hu u. a. (2003, 2004), Ji u. a. (2005) sowie Rawool u. a. (2006) und Croce u. a. (2007) mithilfe von CFD-Programmen den Einfluss künstlicher Rauheiten auf Strömungen in Mikrokanälen indem sie meist quaderförmige Elemente auf die Kanalwände aufbringen. Hierbei zeigen sich erste Probleme mit der Definition der charakteristischen Längen von rauen Wänden und der sich daraus ergebenden Unterschiede in der Auswertung.

Analytische und numerische Modelle müssen jedoch immer validiert werden. Deshalb sind Experimente ein unverzichtbarer Teil der Forschung. Experimente auf diesem Gebiet werden von Kandlikar u. a. (2005), Hao u. a. (2006) und Brackbill u. Kandlikar (2007) sowie Tang u. a. (2007) und Lilly u. a. (2007) durchgeführt, um nur einige neuere Publikationen zu nennen. Dabei steht mittlerweile nicht mehr die Frage nach der Existenz des Einflusses von Wandrauheiten in Mikrokanälen im Vordergrund, da dies bereits weitestgehend akzeptiert ist, sondern die Frage, wie die Ergebnisse so angepasst werden können, dass sie wieder der makroskopischen Theorie des glatten Kanals entsprechen.

An dieser Stelle soll die vorliegende Arbeit ansetzen und den Einfluss von Rauheiten auf laminare Strömungen in allen Kanälen (also Mikro- und Makrokanälen) untersuchen. Dies wird sowohl mithilfe numerischer Modelle als auch experimentell unterstützt geschehen. Der Versuchsstand, mit dem die Untersuchung durchgeführt werden soll, wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

2.2 Konzept des Versuchsstandes

Wie die Beispiele in Abschnitt 2.1 gezeigt haben, beschäftigt sich ein Großteil der experimentellen Forschung mit Mikrokanälen, die in Silizium geätzt wurden. Dieses Verfahren hat jedoch zwei entscheidende Nachteile: Zum Einen sind die Kanäle nach der Herstellung nicht mehr zugänglich, sodass eine nachträgliche definierte und gleichmäßige Veränderung der Kanalwände oder exakte Bestimmung der Geometrie nicht möglich ist. Zum Anderen ist allein durch den Herstellungsprozess, der trotz hoher Genauigkeit geometrische Imperfektionen im Material zurücklassen kann, nicht sichergestellt, dass die Kanäle an jeder Stelle gleiche Geometrien aufweisen (z.B. gleiche hydraulische Durchmesser). Somit sind Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen eines Kanals mitunter nicht direkt auf einen anderen übertragbar.

Die meisten der gefertigten, sogenannten „ebenen Kanäle“, sind also Kanäle mit rechteckigen Querschnitten, die notwendigerweise von 4 Seiten begrenzt sind. Immer wieder wird dabei berichtet, dass das Seitenverhältnis von Höhe zu Breite solcher Kanäle einen Einfluss auf die Strömung im Kanal hat (vgl. Wibel 2008).

Der Einfluss hängt vor allem damit zusammen, dass das Konzept des hydraulischen Durchmessers für turbulente Strömungen mit großer Genauigkeit anwendbar ist, für laminare Strömungen hingegen Abweichungen von bis zu 20 % aufweist (vgl. Herwig 2006). Hinzu kommt,

dass der ideale ebene Kanal keine Seitenbegrenzungen hat, sondern eine Strömung zwischen zwei unendlich ausgedehnten ebenen Platten beschreibt. Eine solche Strömungssituation findet sich jedoch in keinem der Experimente wieder.

Im Zusammenhang mit Rauheiten wird das Problem der nicht-veränderlichen Kanäle noch verstärkt, denn der Einfluss bestimmter Rauheiten bzw. Rautiefen ist mit dem beschriebenen Ätzverfahren nur zu ermitteln, indem unterschiedliche Kanäle mit unterschiedlichen Rauheiten gefertigt werden. Diese Kanäle haben aber die oben beschriebenen geometrischen Abweichungen und sind deshalb nur bedingt miteinander vergleichbar.

Ein weiteres Problem bei experimentellen Untersuchungen laminarer Strömungen in Mikrokanälen ist die Tatsache, dass Messungen oft lediglich am Ein- und Austritt möglich sind, da die Kanäle selbst nach ihrer Fertigstellung, wie bereits angedeutet, schwer zugänglich sind. Auch hier existieren unterschiedliche Konzepte, dieses Problem zu lösen, wie z.B. Shih u. a. (1996) und Kohl u. a. (2005) zeigen.

Weiterhin steht jedoch die Frage im Raum, ob Rauheiten lediglich in Mikrokanälen laminare Strömungen beeinflussen oder ob dies auch in Kanälen mit makroskopischen Abmessungen der Fall ist. Ein Versuchsstand, der diese Frage mithilfe von Experimenten beantworten soll, muss deshalb die beschriebenen Probleme minimieren und klare Aussagen über die strömungsmechanischen Zusammenhänge liefern können. Ein solcher Versuchsstand sollte deshalb die folgenden Vorgaben erfüllen:

1. Der Versuchsstand soll möglichst identisch mit dem Modell des ebenen Kanals sein, sodass eine Vergleichbarkeit mit analytischen Lösungen und einfachen CFD-Modellen erreicht wird.
2. Er soll hydraulische Durchmesser D_h^* aufweisen die im makroskopischen Bereich liegen, diese sollen aber auch auf mikroskopische Abmessungen ($D_h^* < 100 \mu\text{m}$) reduziert werden können.
3. Die Kanalwände sollen frei zugänglich sein, sodass spezielle Wandrauheiten mit hoher Präzision auf sie aufgebracht und anschließend verändert werden können, ohne den Kanal zu zerstören oder neu fertigen zu müssen.
4. Veränderungen der relativen Rauheit $K = k^*/D_h^*$, also dem Verhältnis von Wandrauheitsparameter zu Kanalhöhe, sollen einfach vorgenommen werden können, ohne die Kanalwände zu verändern, also ohne die Rauheit selbst verändern zu müssen.
5. Messungen sollen nach Möglichkeit direkt im Kanal stattfinden, um Eintritts- und Austrittseffekte zu minimieren.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde das folgende Konzept für einen Versuchsstand entwickelt, mit dessen Hilfe Rauheitseinflüsse auf laminare Strömungen untersucht werden können. Dieses Konzept ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Grundidee ist die Verwendung zweier Kreisplatten, deren Abstand voneinander beliebig einstellbar ist. Zwischen ihnen entsteht auf diese Weise ein Spalt kontinuierlich veränderbarer Höhe. Die Kanalhöhe kann nun von makroskopischen bis hin zu mikroskopischen Abmessungen verändert werden, und es sind sowohl Untersuchungen im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich möglich. Durch eine Bohrung in der Mitte der unteren Platte strömt das verwendete Fluid ein, sodass sich im Kanal eine radialsymmetrische Strömung ausbildet.

Die obere Platte hält einen Silizium-Wafer. Dieser ist für Untersuchungen im glatten Kanal poliert, für die Untersuchung des Rauheitseinflusses kann aber auch ein strukturierter, also mit einer definierten Rauheit versehener Wafer verwendet werden. Diese Wafer können dann beliebig ausgetauscht werden, ohne den Kanal selbst zu verändern.

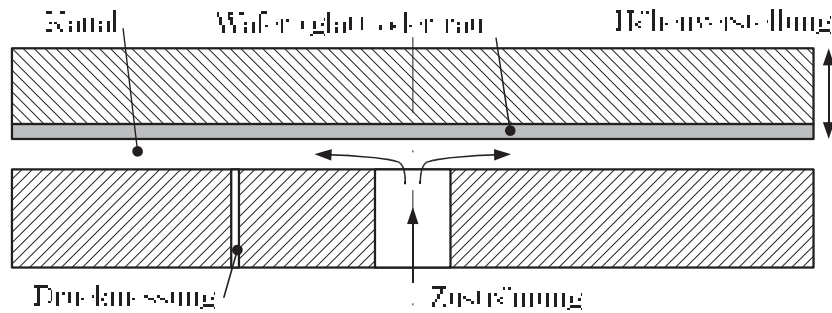


Abbildung 2.1: Konzept des Versuchsaufbaus für die Untersuchung des Einflusses von Rauheiten auf laminare Strömungen

Die Wafer sind gut zugänglich und der Kanal kann jederzeit durch Abnehmen der oberen Kreisplatte überprüft werden, ohne dass er zerstört werden muss. Die kontinuierliche Kanalhöhenverstellung ermöglicht es, zusammen mit der Rauheit des Wafers, relative Rauheiten ebenfalls kontinuierlich einzustellen. Die relative Rauheit $K = k^*/D_h^*$ kann dabei durch Veränderung der Kanalhöhe und damit des hydraulischen Durchmessers bei konstantem Rauheitsparameter k^* verändert werden.

Im Kanal wird der Druck entlang des Radius mithilfe von Messbohrungen in der unteren Kreisplatte gemessen. Die Druckmessung erfolgt somit im Inneren des Kanals entlang der Strömungsrichtung. So können Ergebnisse unabhängig von Ein- und Austrittseffekten betrachtet werden.

Der Kanal selbst verfügt aufgrund seiner Radialsymmetrie über keine seitlichen Begrenzungen, ist also dem ebenen Kanal sehr ähnlich. Die sich ausbildende Strömung ist jedoch verzögert, d.h. die Strömungsgeschwindigkeit nimmt entlang des Kanals (Radius der Kreisplatte) ab. Damit entspricht sie nicht völlig der ebenen Kanalströmung, die unbeschleunigt ist. Folglich existiert eine Abweichung vom theoretischen Modell des ebenen Kanals.

Es ist an dieser Stelle wichtig, Ziele für die vorliegende Arbeit zu formulieren, um die Untersuchung und Auswertung der Ergebnisse systematisch und strukturiert durchführen zu können.

2.3 Ziel der Arbeit

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Einflusses von Rauheiten auf laminare Strömungen. Dabei soll eine Möglichkeit zur Quantifizierung des Einflusses gefunden und überprüft werden. Dies soll auf systematisch experimentellem Weg geschehen und zusätzlich durch numerische Modellierung unterstützt werden. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf Strömungen in Makrokanälen.

Die im Experiment vorliegende radialsymmetrische Strömung muss für den makroskopischen Fall auf ihre Besonderheiten hin (Verzögerung) untersucht werden, um ein theoretisches Modell herzuleiten, welches die Strömung in glatten Kanälen möglichst genau abbildet. Für Strömungen in rauen Kanälen muss ebenfalls ein Modell gefunden werden, welches zusätzlich in der Lage ist, den Rauheitseinfluss auf laminare Strömungen (sofern er vorhanden ist) genau zu beschreiben und Rückschlüsse auf andere Strömungssituationen zuzulassen. Diese Modelle sollen dann mithilfe von Experimenten validiert werden.

Alle Experimente können sowohl mit Luft als auch mit Helium durchgeführt werden. Durch Verwendung dieser zwei unterschiedlichen einphasigen Fluide wird nicht nur eine strukturierte Analyse der radialsymmetrischen Strömung ermöglicht, sondern es können zusätzlich die experimentellen Ergebnisse miteinander verglichen und so Erkenntnisse über das genaue Strömungsverhalten gewonnen werden.