

EINSATZ MINIATURISierter LASER DOPPLER ANEMOMETER ZUR BESTIMMUNG DER STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT IN OFFENEN KAPILLARKANÄLEN UNTER WELTRAUMBEDINGUNGEN

C. Fechtmann, U. Rosendahl, M. Dreyer

Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) / Universität Bremen
Am Fallturm, D – 28359 Bremen

Zusammenfassung

Wir berichten über die ersten LDA Messungen im Weltraum an einem offenen Kapillarkanal mit dem am ZARM entwickelten miniaturisierten LDA-System.

Im Dezember 2004 wurde auf einer TEXUS Sounding Rocket Mission erfolgreich ein LDA-System eingesetzt, um eine Flüssigkeitsströmung zwischen zwei parallelen Platten zu untersuchen. Bei dieser offenen Kapillarströmung bildet sich auf den beiden Seiten zwischen den Platten eine freie Grenzfläche, deren Form beobachtet wird. Die Form dieser Grenzflächen, sowie die maximale Strömungsgeschwindigkeit bzw. der maximale Volumenstrom beim Kollaps der freien Oberfläche sind Gegenstand der aktuellen Forschung und hängen stark von der Geometrie des Kanals, sowie den Stoffeigenschaften der verwendeten Flüssigkeit ab.

Mittels eines wellenlängenselektiven Spiegels konnten bei dem verwendeten Experimentaufbau gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalmitte mittels LDA als auch die Strömung und ihre freien Oberflächen mit einer CCD-Kamera beobachtet und quantitativ vermessen werden. In unserem Beitrag wollen wir das Experiment sowie die erzielten Ergebnisse, wie auch die speziellen Anforderungen des am ZARM entwickelten LDA Systems vorstellen.

Einleitung

Unter Schwerelosigkeit werden vor allem die Kapillarkräfte zum Fördern und Positionieren von Flüssigkeiten benutzt. Unter diesen Bedingungen sorgt die Erdbeschleunigung im Gegensatz zu den Bedingungen auf der Erde nicht mehr für eine eindeutige Lage der Flüssigkeitsoberfläche. Die Kapillarkräfte, deren Wirkung auf der Erde auf kleine Abmessungen der Größenordnung von einigen Millimetern beschränkt ist, können unter Schwerelosigkeit über Entfernungen von Metern die freie Oberfläche beeinflussen. Dies ist nicht nur von wissenschaftlichem Interesse, sondern findet beispielsweise zur Flüssigkeitsförderung in Treibstofftanks eine direkte Anwendung. Für eine optimale Auslegung und den sicheren Betrieb müssen die Grenzen der in offenen Kapillarkanälen auftretenden Strömungen bekannt sein, da nur blasenfreier Treibstoff den Triebwerken zugeführt werden darf.

Aus strömungsmechanischer Sicht muss es in einem offenen Kapillarkanal eine feststehende Höchstgeschwindigkeit geben (ähnlich der Schallgeschwindigkeit in Luft), die auch nicht durch Pumpen oder andere Energiezufuhr überschritten werden kann. Um diese Geschwindigkeit und damit den Punkt des Kollabierens der freien Oberfläche bestimmen zu können, muss die freie Oberfläche mit großer Präzision vermessen werden. Zudem sind Daten über die Strömungsgeschwindigkeit an ausgewählten Punkten des Strömungskanals erforderlich.

Theoretischer Hintergrund

Ziel des Experimentes ist die Untersuchung einer Strömung durch einen offenen, engen Kanal, einen so genannten Kapillarkanal. Er besteht aus zwei parallelen Platten der Breite b , die sich in einem Abstand a zueinander befinden. Während der Kanal am Ein- und Auslass ist noch rundum geschlossen ist, so ist der eigentliche Kapillarkanal über eine Länge l an beiden Seiten offen. Die Aufrechterhaltung einer Strömung durch einen solchen Kanal mit freien Seiten ist nur unter Schwerelosigkeit möglich, da unter Erdschwerkraft die Experimentflüssigkeit (HFE-7500 von 3M) herauslaufen würde. Infolge der Durchströmung des Kanals mit der niedrigviskosen Experimentflüssigkeit entstehen Druckänderungen, die direkt mit der freien Oberfläche in Wechselwirkung stehen. An den offenen Seiten des Kanals kann sich unter Mikrogravitation eine freie Oberfläche ausbilden, wenn der innere Druck p niedriger ist als der Umgebungsdruck p_a . In diesem Fall ist die freie Oberfläche nach Innen gekrümmt und die Oberflächenkrümmung R nimmt entlang der Strömungsrichtung zu.

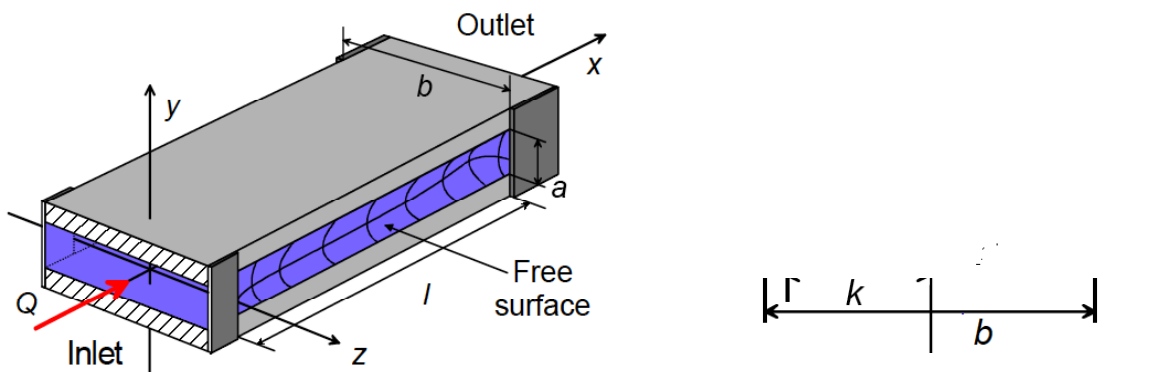


Abb. 1: Offener Kapillarkanal

Wenn der Kapillardruck an den Oberflächen die Druckdifferenz $p - p_a$ zwischen Umgebungsdruck p_a und Innendruck p ausgleicht, kann sich für einen Volumenstrom Q , der kleiner ist als der kritische Volumenstrom Q_{krit} eine stabile Strömung ausbilden (s. Abb. 2.a). Für den Fall, dass der Volumenstrom Q den kritischen Wert Q_{krit} überschreitet, wird die Strömung instabil und es kommt zu einem Kollaps der freien Oberfläche in der Nähe des Auslasses des offenen Kapillarkanal. Der innere Druck ist zu klein, die freie Oberfläche kollabiert, und aus der Umgebung wird Gas eingesogen. Aus der stabilen einphasigen Strömung wird oberhalb von Q_{krit} eine instabile zweiphasige Strömung, da Gas bzw. Luft aus der Umgebung in den Auslass des Kanals eingesaugt wird.

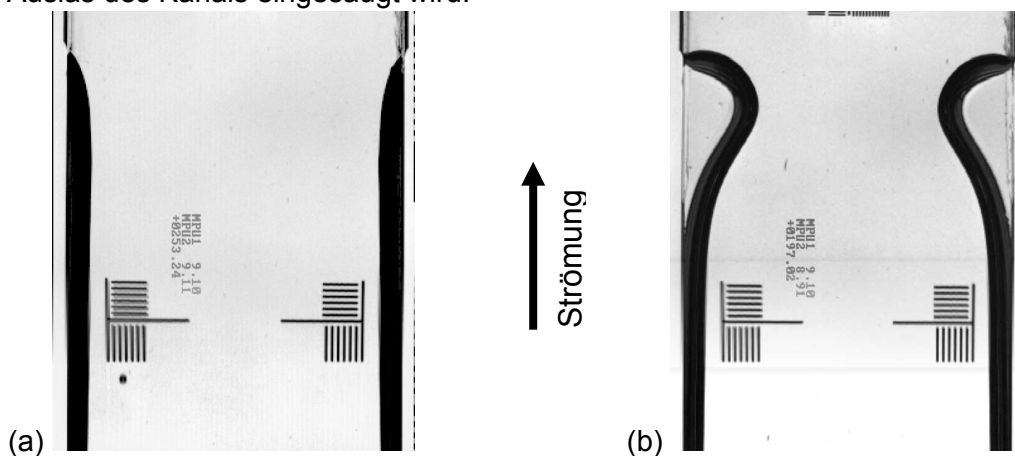


Abb. 2: (a) Stabile Strömung ($Q < Q_{\text{krit}}$) und (b) instabile Strömung ($Q > Q_{\text{krit}}$)

Sowohl theoretisch, als auch experimentell konnte inzwischen nachgewiesen werden (Rosen Dahl et. al. 2004), dass der Volumenstrom im offenen Kapillarkanal durch einen vergleichbaren „choking“-Effekt limitiert wird, wie er auch bei der Strömung eines kompressiblen Gases durch ein Rohr beobachtet wird. Choking oder Drosselung bezeichnet hier den Effekt, dass der Massenstrom einer Strömung seinen Maximalwert erreicht, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v eine bestimmte, limitierende Wellengeschwindigkeit erreicht. Diese ist im Falle der Strömung eines kompressiblen Gases durch die Schallgeschwindigkeit v_s definiert. Die charakteristische Kennzahl für diese Strömung ist die Machzahl Ma mit $Ma = v / v_s$ und der maximale Massenstrom ergibt sich für $Ma = 1$.

Ein vergleichbares Verhalten wird auch bei der gravitationsdominierten offenen Kanalströmung beobachtet. Hier ist die charakteristische, limitierende Geschwindigkeit durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flachwasserwellen v_{sw} bestimmt. Die charakteristische Kennzahl ist die Froude-Zahl Fr , wobei auch hier bei $Fr = 1$ der maximale Massenstrom beobachtet wird. Für die hier untersuchte Strömung durch einen offenen Kapillarkanal lässt sich ganz analog eine charakteristische Kennzahl S (Speed-Index) mit $S = v / v_{ca}$ definieren, wobei v_{ca} die Ausbreitungsgeschwindigkeit der kleinen (linearen) Kapillarwellen ist.

In guter Analogie zeigen sowohl die theoretischen Überlegungen, als auch die numerischen und experimentellen Untersuchungen, dass auch bei dieser Strömung der maximale Massen- bzw. Volumenstrom bei einem kritischen Strom Q_{krit} zu beobachten ist, der auftritt, wenn der Speed-Index $S = 1$ ist, mit:

$$S = \frac{v}{v_{ca}} \quad \text{und} \quad v_{ca} = \sqrt{-A \frac{dh}{dA}},$$

wenn v_{ca} die Kapillarwellengeschwindigkeit, A der Querschnitt der Strömung und h die Krümmung der freien Oberfläche in Strömungsrichtung ist.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden bereits im Frühjahr 2000 an Bord der Höhenforschungsrakete TEXUS-37 erste Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Volumenstrom zwischen den parallelen Platten in kleinen Schritten während der Phase der Schwerelosigkeit erhöht wurde. Leider zeigte es sich aber, dass in der Nähe des kritischen Volumenstromes selbst kleinste Änderungen von Q zu großen Störungen der Strömung resultierten, die wiederum zu einem Kollaps der freien Oberflächen vor dem Erreichen des kritischen Volumenstromes führten. Mit Hilfe von numerischen Lösungen konnte gezeigt werden, dass der maximale noch stabile Volumenstrom, der in diesem Experiment noch eingestellt werden konnte, 95% des kritischen Volumenstromes entsprach.

Um noch besser den kritischen Volumenstrom zu nähern, wurde während für das Experiment auf der TEXUS-41 nicht nur vorgesehen den Volumenstrom mit „groben“ und „feinen“ Schritten zu variieren, sondern auch bei konstantem Volumenstrom Q , die Länge des Kapillarkanals zu verändern. Hierzu wurden anstelle eines fest vorgegebenen Kanals wie bei TEXUS-37, verstellbare Schieber an den offenen Seiten der parallelen Platten vorgesehen, mit denen die Kanallänge in Schritten von ca. 0,1 mm variiert werden kann. Eine Vergrößerung der Kanallänge l sollte nach der Theorie zu dem gleichen Effekt der Strömungsbegrenzung führen, wie eine Erhöhung des Volumenstromes Q , sich aber zum einen wesentlich genauer kontrollieren lassen und zum anderen deutlich geringere Störungen in der Strömung induzieren. Des Weiteren wurde bei diesem neuen Experiment ein deutlich kürzerer Kanal mit den Abmessungen $a = 12$ mm, $b = 25$ mm und einer von 12 mm bis 19mm einstellbaren Länge l verwendet, bei dem die Strömung durch den konvektiven Term dominiert ist, die bisher noch nicht untersucht wurde.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau (s. Abb. 3.b) wurde von EADS Space Transportation Bremen aufgebaut und später in einem der Module der Höhenforschungsrakete TEXUS-41 integriert. Die TEXUS-Raketen ermöglichen es Technische **EX**perimente **U**nter **S**chwereelosigkeit für eine Zeit von ca. 6 Minuten durchzuführen. Der Start erfolgte am 2.12.2004 mit insgesamt 4 wissenschaftlichen Experimenten an Board in Esrange / Schweden.

Gesamtaufbau

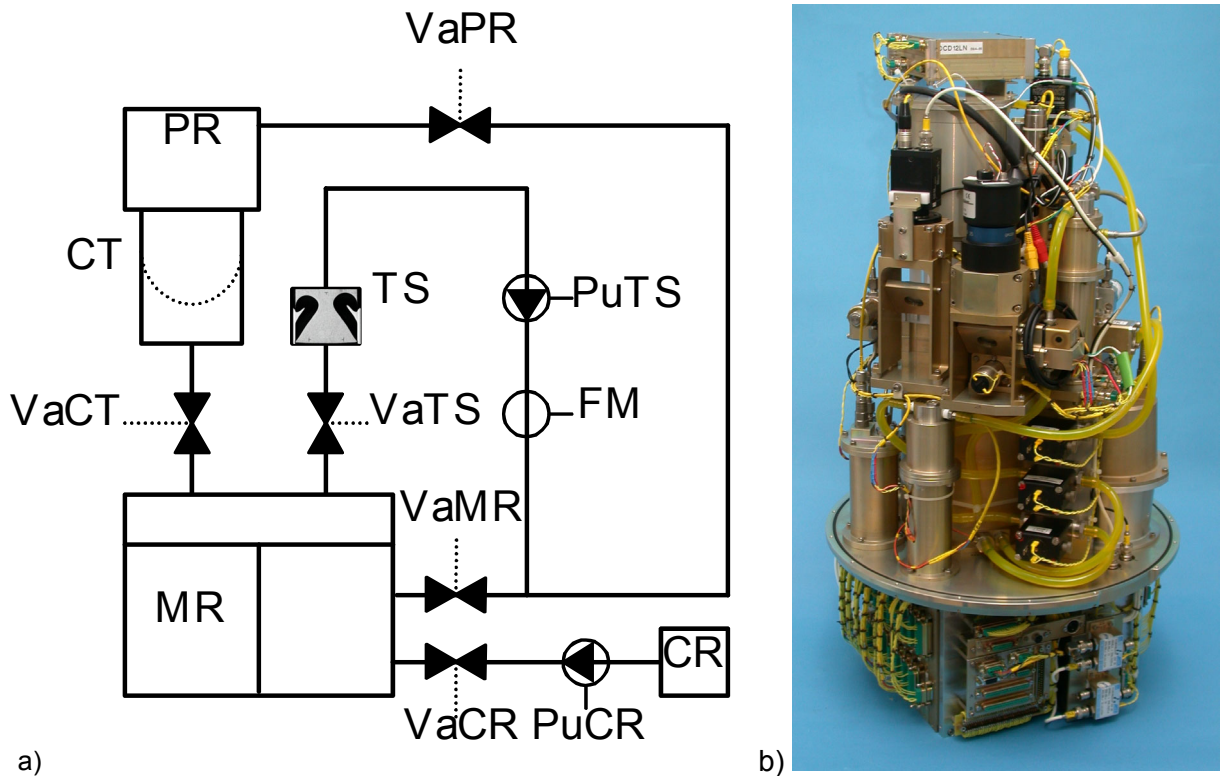


Abb. 3: Prinzipskizze des Flüssigkeitskreislaufes (links) und Experimentmodul (rechts)

Die Abbildungen 3.a und 3.b zeigen zum einen die Prinzipskizze des strömungsphysikalischen Anteils des Experimentes, sowie das komplette Experiment-Modul. Der Flüssigkeitskreislauf besteht natürlich zum einen aus der Testzelle (TS), die über das Ventil (VaTS) mit dem Haupttank (MR) verbunden ist. Dieser ist außerdem über ein Ventil (VaCT) mit dem Ausgleichsbehälter (CT) verbunden, sowie mit einem zusätzlichen Tank (CR), aus dem nach Öffnen der Ventile (VaCR & VaCT) bei Erreichen der Schwerelosigkeit der Ausgleichsbehälter befüllt wird. Dieser dient zum einen dazu, zu Beginn des eigentlichen Experimentes die Testzelle mit einer definierten Menge an Flüssigkeit zu versorgen, da der offene Kapillarkanal unter Schwerelosigkeit allein durch kapillares Steigen der Flüssigkeit zwischen den Platten befüllt werden soll. Eine entsprechende Befüllprozedur wurde vorher mittels numerischer Simulation in Flow3D ausgearbeitet. Sobald die Testzelle und der Bereich bis zur Pumpe (PuTS) befüllt ist, wird der eigentliche Flüssigkeitskreislauf über die Pumpe und den Volumenstromsensor (FM) über das inzwischen geöffnete Ventil (VaMR) geschlossen.

Der Haupttank ist über Bleche in vier Teilbereiche aufgeteilt, die über Bohrungen miteinander kommunizieren können. Auf diese Weise soll die Rotation der Flüssigkeit aufnehmen, die sich durch den für einen kontrollierten Start erforderlichen Spin der Rakete ergibt. Damit eine am Beginn des Experimentes noch vorhandene Restrotation der Flüssigkeit das Experiment nur minimal beeinflussen kann, wurde die Testzelle (TS) außerdem so angeordnet, dass sie mit der Rotationsachse der Rakete übereinstimmt. Alle Öffnungen oberhalb des Tanks sind mit feinen Sieben (Maschenweite 50 μm) bedeckt, die verhindern sollen, dass größere Gasblasen in die Messstrecke eindringen können.

Messzelle

Die Messzelle ist der zentrale Bestandteil des gesamten Experimentes. Sie besteht aus zwei parallelen Glasplatten mit 5 mm Dicke, die zusätzlich auf den Außenseiten eine antireflex Beschichtung, sowie Messstreifen zur Kalibration der Videobilder haben. Die Glasplatten sind übergangslos in der Bodenplatte der Testzelle eingeklebt, in der sich auch der rechteckige Einlass befindet, dessen Öffnung genau an den Querschnitt des Kanals angepasst ist. Am Auslassende geht der rechteckige Kanalquerschnitt langsam in den runden Querschnitt der Auslassöffnung über an der dann die Schlauchzuführung zur Pumpe des Systems und des darauffolgenden Volumenstromsensors angeschlossen werden.

Um zu verhindern, dass Flüssigkeit aus dem offenen Kanal austritt, ist der Spalt zwischen den beiden Platten mit zwei scharfkantigen Vorhängen besetzt. Die Variation der Kanallänge l wird mit Hilfe von zwei Schiebern realisiert, die sich entlang der vier Führungsstäbe mit einer Auflösung von $\Delta l \leq 0,1$ mm kontinuierlich verfahren lassen.

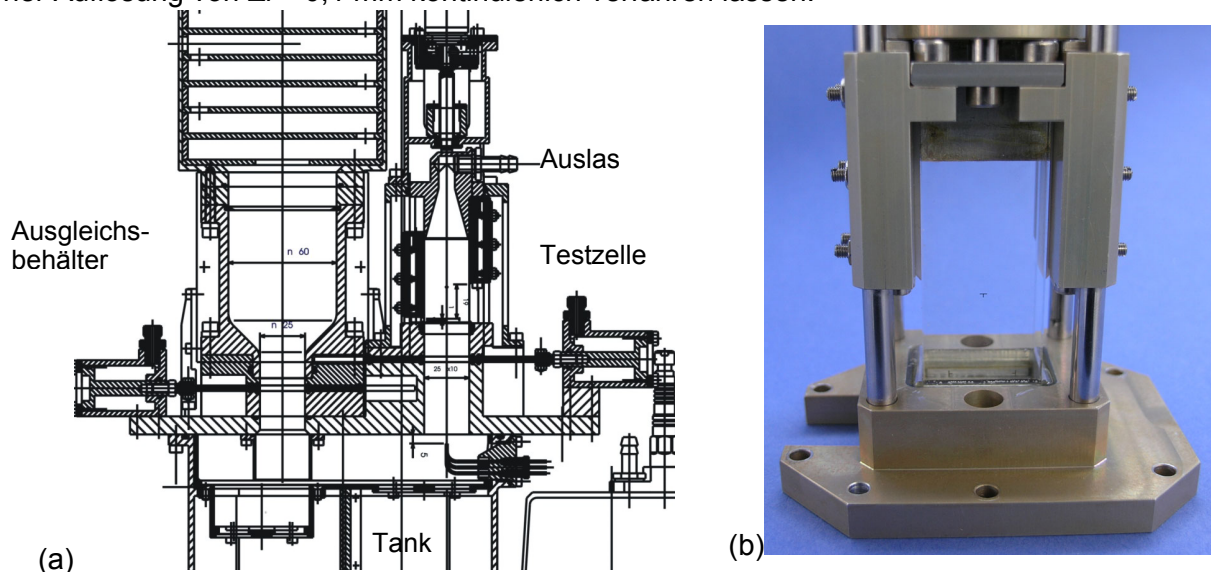


Abb. 4: (a) Zeichnung des Experimentaufbaus mit Ausgleichsbehälter, Testzelle mit Schieber, Ein- und Auslass sowie Ventilen, Sieben usw.,
(b) Testzelle mit Bodenplatte, parallelen Glassplatten und seitlich angeordneten Schiebern.

Optik

Um die Strömung und vor allem die freien Oberflächen in der Testzelle, als auch die Flüssigkeit im Ausgleichsbehälter wurde je eine CCD Kamera mit einem telezentrischen Objektiv verwendet. Die Testzelle wurde dabei mittels einer kollimierten LED-Beleuchtung von hinten

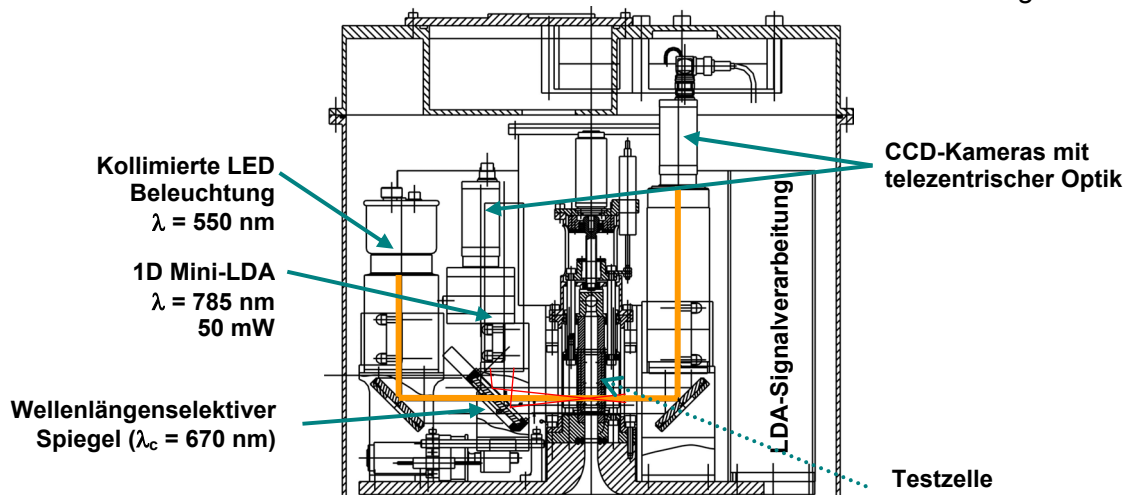


Abb. 5: Prinzipskizze des optischen Aufbaus.

durch einen für diese Wellenlänge durchlässigen wellenlängenselektiven Spiegel beleuchtet. Beide Videosignale werden per Telemetrie zur Bodenstation gefunkt, wo sie dem Operator erlauben in Echtzeit das Experiment zu beobachten und letztendlich zu manuell per Telekommandos zu steuern. Das Videosignal der Testzelle wird zusätzlich auch noch on-board digital aufgezeichnet. Der wellenlängenselektive Spiegel dient außerdem dazu parallel zur Analyse der freien Oberflächen im Kapillarkanal auch eine Messung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Laser-Doppler-Anemometer zu ermöglichen.

Laser Doppler Anemometer

Um die Strömungsgeschwindigkeit in der Kanalmitte, sowie am Ende des Fluges auch ein Geschwindigkeitsprofil der Strömung vermessen zu können, wurde der Messkopf oberhalb des wellenlängenselektiven Spiegels montiert. Dieser ganze Aufbau kann mit Hilfe eines Lineartisches senkrecht zur Strömung entlang der Beobachtungsrichtung verfahren werden.

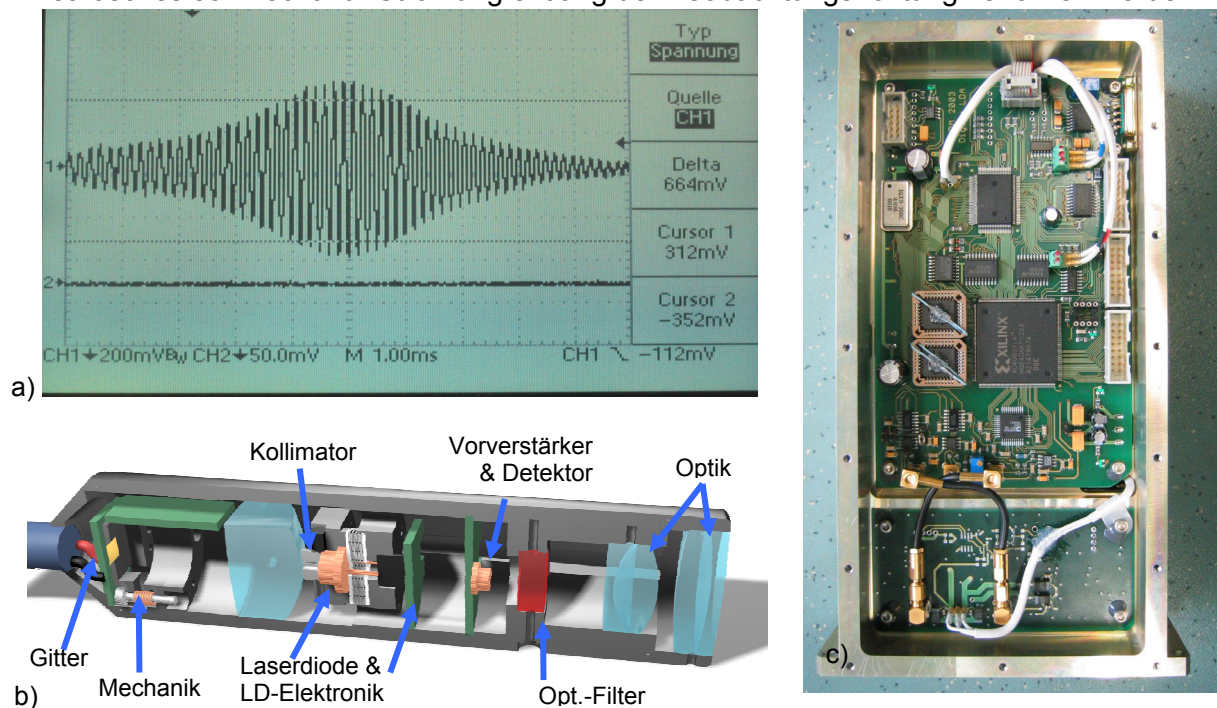


Abb. 6: a) Burstsinal des Mini-LDA in Rückstreuung (Wolframdraht 4 μ m) nach Vorverstärkung und Filterung im Messkopf, b) Aufbau des Messkopfes & c) Analoge und digitale LDA-Signalverarbeitung für Texas 41

Das von uns am ZARM entwickelte LDA-System zeichnet sich durch ein geringes Gewicht (< 2kg) und einen geringen Leistungsverbrauch (ca. 5W) aus, die es u.a. erst ermöglichen LDA-Messungen auch unter den für Weltraumbedingungen üblichen Restriktionen durchzuführen. Der Messkopf ist dabei wie in Abb. 6.b gezeigt aufgebaut. Das Licht einer Laserdiode ($\lambda = 785 \text{ nm}$ und 40 mW, d.h. 50% max. Leistung) wird mittels einer Asphäre kollimiert und auf ein speziell angefertigtes Reflexionsgitter fokussiert, das als Strahlteiler dient. Die gebeugten Strahlen werden wieder kollimiert, an Laser und Detektorelektronik vorbei über die Frontlinse in das Messvolumen fokussiert. Das zurückgestreute Licht wird über diese Frontlinse und einen weiteren Achromaten auf die PIN-Diode gelenkt. Hier wird das Burstsinal mittels eines Transimpedanzverstärkers verstärkt. Eine weitere Verstärkerstufe filtert das Signal und entfernt den DC-Anteil (Hochpass $f_c = 1 \text{ kHz}$). Von dort wird das Signal als differentiell Paar zur eigentlichen Signalverarbeitung geschickt, wo es nochmals analog verstärkt und dann mit 32.768 MHz digitalisiert wird. Die Frequenzbestimmung erfolgte mittels des vom ZARM entwickelten 5-Level-Counter Verfahrens. Aufgrund der niedrigen zur Verfügung stehenden Datenrate, wurde dann jede Sekunde ein Datenpaket zur Bodenstation geschickt, dass je Sekunde die kleinste, die mittlere und die größte beobachtete Geschwindigkeit, sowie die Anzahl der Bursts, die mittlere Burstlänge und die Signalamplitude enthält.

Flüssigkeit & Tracer

Als Experimentflüssigkeit wurde HFE-7500 von 3M verwendet dem etwa 0,1% Gewichtsprozent an „silver coated hollow spheres“ der Firma Potter als Tracer beigelegt wurden. Zusätzlich zu den Tracern die sich im Tank (MR) befanden, gab es auch noch einen speziellen Vorratsbehälter mit einer höher konzentrieren Tracer-Lösung, die in den Einlassbereich der Testzelle gepumpt hätte werden können, falls dies für das LDA notwendig gewesen wäre.

Experimentdurchführung

Vor der Mission ist zunächst nur das Flüssigkeitsreservoir gefüllt, der Strömungskanal ist aufgrund der Erdschwerkraft und Beschleunigung der Rakete während der Aufstiegsphase leer. Nach Brennschluss und Erreichen der Schwerelosigkeit werden per Telekommando mehrere Ventile geöffnet und die notwendigen freien Oberflächen im Strömungskanal selbst sowie in einem Ausgleichsrohr mit 60 mm Durchmesser erzeugt. Der Kanal wird zu diesem Zeitpunkt nur mit einer geringen Strömungsgeschwindigkeit (weniger als 50 % des erwarteten kritischen Wertes) durchströmt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird dann vom Boden gesteuert in kleinen Schritten erhöht, um den kritischen Wert zu finden, bei dem Gas eingesogen wird. Während der gesamten Zeit werden Aufnahmen des Experimentes von zwei Kameras zur Bodenstation übermittelt. Ein Kanal wird zusätzlich an Bord digital aufgezeichnet. Anhand der ohne Zeitverlust vorliegenden Bilder entscheiden die Experimentatoren, wie und welcher Parameter des Experiments geändert werden soll. Diese Informationen werden per Telekommando zur Rakete gesendet und dort ausgeführt. Während der Freiflugphase der Nutzlast von ca. 6 Minuten wird das Experiment manuell vom Boden aus gesteuert.

Ergebnisse

Nach dem erfolgreichen Start konnte die Befüllungsprozedur wie vorgesehen durchgeführt werden. Leider stellte sich jedoch heraus, dass der kritische Volumenstrom etwas geringer war als berechnet und dass die Reaktion der Strömung auf Veränderungen deutlich stärker war als angenommen.

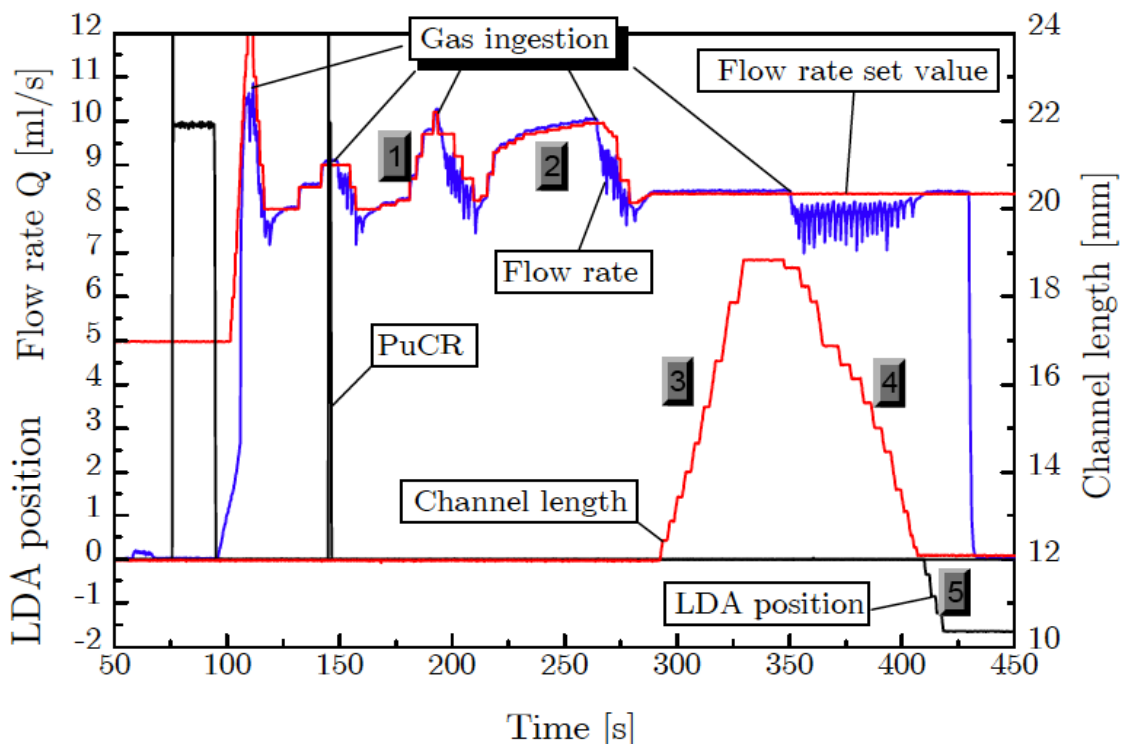


Abb. 7: Verlauf der eingestellten Experimentparameter (Volumenstrom, Kanallänge, LDA-Position) über der Flugzeit und gemessener Volumenstrom (blau)

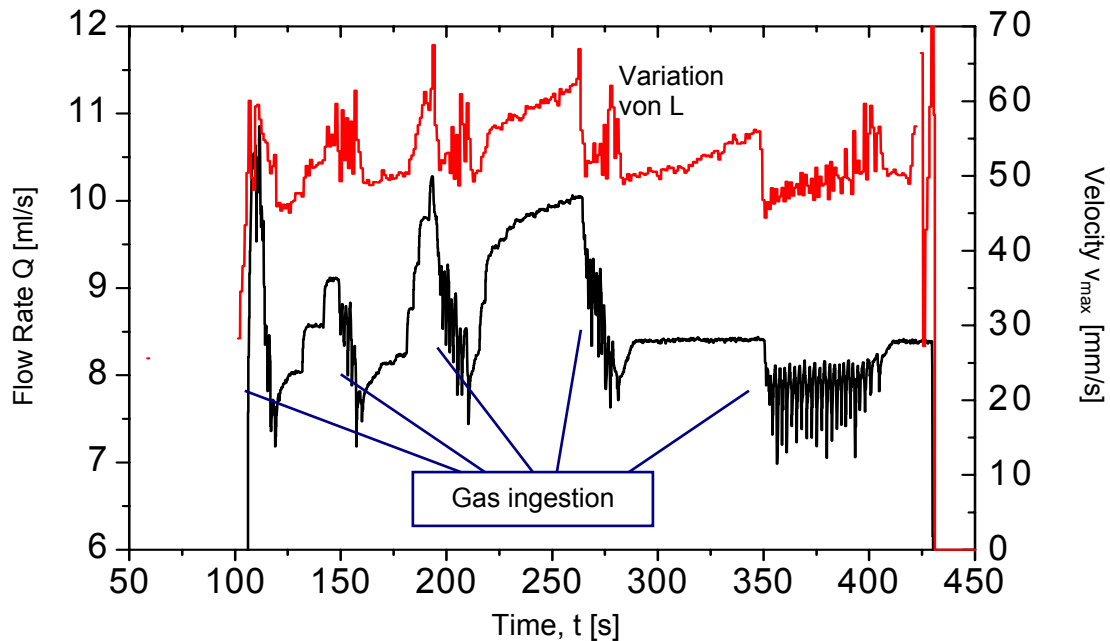


Abb. 8: Vergleich von gemessenen Volumenstrom und Strömungsgeschwindigkeit

Die mittels LDA gemessene Strömungsgeschwindigkeit folgt wie erwartet dem gemessenen Volumenstrom. Insbesondere konnte bei der Variation der Kanallänge bei konstantem Volumenstrom der Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung des kritischen Volumenstroms, bis zu dem eine stationäre Durchströmung des Kanals möglich ist, sowie die Kontur der freien Oberfläche. Darüber hinaus wurde zum ersten Mal die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Laser-Doppler-Anemometers im Kanal vermessen. Die Ergebnisse des Experimentes sind bereits für sich genommen sowohl für die Flüssigkeitshandhabung unter Schwerelosigkeit als auch für grundlegende Fragen der Strömungsmechanik von Bedeutung. Zusätzlich zu den wissenschaftlichen und technologischen Erkenntnissen stellt der Flug aber auch eine Vorbereitung eines ähnlichen, noch komplexeren Experimentes für die Internationale Raumstation ISS dar. Zu diesem Zweck soll im November 2005 ein weiterer Flug dieses Experimentes auf einer TEXUS-Rakete erfolgen, bei dem eine leicht modifizierte Testzelle mit einem anderen Fluid eingesetzt werden sollen.

Dankesworte

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50WM0421 und 50WM0535 gefördert. Die Experimenthardware wurde von EADS ST in Bremen gebaut und die Autoren möchten sich besonders bei Herrn D. Grothe und J.-P. Kunst für ihren Support bedanken.

Literatur

- [1] Rosendahl, U., Ohlhoff, A., Dreyer, M. E., Rath, H. J.: Investigation of Forced Liquid Flows in Open Capillary Channels; *Microgravity – Science and Technology XIII/4* (2002).
- [2] Fechtmann, C.: Entwicklung Miniaturisierter Laser Doppler Anemometer; GALA- Jahrestagung 2002, Rostock, 2002.
- [3] Rosendahl, U., Ohlhoff, A., Dreyer, M. E.: Choked flows in open capillary channels: theory, experiment and computations; *Journal of Fluid Mechanics* (2004), vol. 518, p. 187-21