

Einsatz eines miniaturisierten Laser Doppler Anemometers zur Bestimmung der Geschwindigkeiten in geschlossenen und offenen Kapillarkanälen

C. Fechtmann, B. Kula, A. Ohlhoff, J. Mey, U. Rosendahl und M. Dreyer

ZARM – Universität Bremen, Am Fallturm, D – 28359 Bremen / Germany

Wir berichten über den geplanten Einsatz des am ZARM entwickelten miniaturisierten LDA-Systems an einem geschlossenen Kapillarkanal. Dabei sollen neben Geschwindigkeiten in der Kanalmitte auch Geschwindigkeitsprofile vermessen werden. Mittels eines wellenlängenselektiven Spiegels kann gleichzeitig mit den LDA-Messungen die hintergrundbeleuchtete Strömung (und ggf. die freie Oberfläche) mit einer CCD-Kamera beobachtet und bei der offenen kapillaren Kanalströmung quantitativ vermessen werden.

Einleitung

Bei der kapillaren Kanalströmung handelt es sich um eine Flüssigkeitsströmung zwischen zwei parallelen Platten, welche im Bodenversuch geschlossen und unter Mikrogravitationsbedingungen offen ist. Bei der offenen Kapillarströmung bildet sich auf den beiden Seiten der 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 Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeit ab. Technische Anwendung finden diese als offene Kapillaren bezeichneten Kanäle beliebiger Geometrie beispielsweise in so genannten Oberflächenspannungs-Satellitentanks, Heat Pipes oder porösen Medien.

Unter Mikrogravitation wirkt auf die freie Oberfläche des durchströmenden Fluids im Wesentlichen nur die Kapillarkraft. In Satellitentanks verwendet man diese kapillaren Steighilfen, um Treibstoff zu fördern, zu transportieren und zu positionieren. Da in einem Satelliten, aufgrund seiner Umlaufbahn um die Erde, die Gravitation größtenteils kompensiert ist, reicht der hydrostatische Druck allein nicht aus, um diese Aufgabe zu übernehmen.



Abb.1: Oberflächenspannungstank (EADS)

Daher muss auf andere Förderungsmechanismen zurückgegriffen werden, um den Tankauslass ständig mit Treibstoff zu versorgen. Viele Tankkonzepte machen sich

22.2

hierzu die Kapillarkräfte zunutze und versehen den Tank mit Kapillaren verschiedenster Geometrien. Aufgrund der guten Benetzungseigenschaften der verwendeten Treibstoffe füllen diese sich vollständig, sobald sie mit Treibstoff in Kontakt kommen. Bei der Entnahme von Treibstoff stellen die kapillaren Steighilfen eine Verbindung als offener Flüssigkeitskanal zwischen der Restmenge des Treibstoffes und dem Auslass des Tanks und letztendlich mit dem Triebwerk her.

Der Vorteil dieses Förderungsmechanismus im Vergleich zu anderen Verfahren liegt im geringen Gewicht der Kapillaren, ihrer Beständigkeit gegen aggressive Treibstoffe, da sie zu 100% aus Titan gefertigt werden können, und der hohen Zuverlässigkeit, da keine beweglichen Teile verwendet werden. Der Nachteil dieser Methode des Flüssigkeitstransportes liegt in der Funktionsbeschränkung durch hohe Beschleunigung und hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Beide können bei einem Triebwerksmanöver zum Abbruch der Treibstoffversorgung und zum Eintreten von Gas in das Triebwerk führen. Bisher wird dieses Problem durch die Verwendung eines wiederbefüllbaren Reservoirs umgangen, in dem stets ausreichend Treibstoff für ein Manöver kapillar gehalten wird. Während des Manövers wird das Triebwerk aus diesem Reservoir gespeist, danach wird es über kapillare Steighilfen selbsttätig wiederbefüllt. Aus technischer Sicht ist die direkte Treibstoffentnahme über Kapillaren – etwa schmalen Blechen, die parallel zur Tankwand befestigt sind – von großem Interesse, da sich erhebliche Kosten einsparen lassen. Die Untersuchungen sind daher sowohl aus technischer wie auch wissenschaftlicher Sicht von großem Interesse, da diese Kapillarströmungen bisher nur mit wenigen numerischen Modellen und noch weniger Experimenten untersucht worden sind.

Theorie

Im Vordergrund der Untersuchungen am ZARM steht die Untersuchung der Funktionsbeschränkung der Kapillaren durch Choking und Volumenstrombeschleunigung. Das Phänomen des Choking ist von stationären Strömungen in Gasen durch geschlossene Querschnitte oder Flüssigkeitsströmungen mit freier Oberfläche unter Schwerkraft bekannt. Es bewirkt, dass der Massen- bzw. Volumenstrom einer Strömung in einer beliebigen Geometrie, wie etwa in Kapillaren, nicht beliebig gesteigert werden und einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten kann. Eine zentrale Rolle kommt dabei der Geschwindigkeit zu, mit der sich (physikalische) Informationen im Fluid ausbreiten. Erreicht das strömende Fluid lokal diese Geschwindigkeit, so erreicht auch der Fluiddurchsatz sein Maximum. Eine Erhöhung des Durchsatzes ist selbst bei einer Erhöhung der treibenden Kräfte prinzipiell nicht möglich. Die Strömung ist gedrosselt. Diese kritische Geschwindigkeit für das Auftreten des stationären Chokings wird in kompressiblen Medien durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Dichtewellen in der Kapillare bestimmt. Aber auch durch Volumenstrombeschleunigungen bei kurzzeitiger Erhöhung des entnommenen Fluidstromes (instationäres Choking) etwa durch Zünden eines Triebwerkes tritt eine

Funktionsbeschränkung auf. Wird ein bestimmter Grenzwert überschritten, kollabiert der Fluidstrom und die Triebwerksversorgung ist unterbrochen. In der für das Frühjahr 2004 geplanten TEXUS Raketenmission, über dessen Vorversuche am Boden wir hier berichten, soll aber vor allem das stationäre Choking Phänomen untersucht werden. In von der ESA geförderten Fallturmexperimenten konnte erstmals das zwangsgetriebene Durchströmen offener Kapillaren unter Schwerelosigkeit untersucht werden. Hierbei zeigte sich, dass die experimentellen Ergebnisse in guter Übereinstimmung zu den Ergebnissen einer eindimensionalen Impulsbilanz der durchströmten Geometrie stehen. Bisher wurde das Durchströmen offener Kapillaren unter Abwesenheit der Schwerkraft in der Literatur kaum behandelt [5,6,7,8]. Aufgrund der freien Oberfläche sollte eine solche kapillare Strömung aber prinzipielle Ähnlichkeiten zur offenen Gerinneströmung zeigen. Hier bildet die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwerewellen eine entsprechende limitierende Geschwindigkeit (FROUDEZAHL-Problem) [1,2,3,4,9,10,11]. Analog zur veränderlichen Dichte kompressibler Medien ist bei Strömungen mit freier Oberfläche oder der Durchströmung flexibler Röhren die durchströmte Querschnittsfläche veränderlich.

Die charakteristische Kennzahl hierzu ist die WEBER-Zahl, der Quotient aus Strömungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Kapillarwellen.

Numerische Modellrechnungen von Jaeckle zu der Kapillarströmung einer „simple vane“, einem schmalen Blech, das senkrecht zur Wand eines Oberflächenspannungstankes befestigt ist, zeigen, dass die Kapillarkräfte die Flüssigkeit in Blechnähe halten und so einen offenen Kanal bilden. Die Veränderung des Volumenstromes führt zu einer Änderung des Krümmungsradiuses der freien Oberflächen in Abhängigkeit von den Stoff- und Geometriedaten. Der maximale Volumenstrom wird näherungsweise bei der Kapillarwellengeschwindigkeit v_c erreicht:

$$v_c = \sqrt{\sigma/(2\rho R)}$$

Zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit muss ein mittlerer Krümmungsradius der freien Oberfläche bekannt sein. Dieser ist jedoch stark von der verwendeten (Experiment-)Geometrie abhängig.

Bisherige Experimente

Es wurden bereits seit längerem Fallturmversuche zu diesem Thema durchgeführt, bei denen bisher jedoch nur der Volumenstrom sowie die Krümmungsradien der freien Oberflächen experimentell bestimmt wurden. Mit dem am ZARM entwickelten miniaturisierten Laser-Doppler-Anemometer sollen jetzt in einer TEXUS-Raketenmission erstmals direkt die Geschwindigkeiten in der offenen Kapillarströmung vermessen werden. Aufbauend auf den am ZARM vorhandenen Kenntnissen zum kapillaren Steigen von Flüssigkeiten in offenen und geschlossenen Geometrien soll die Durchströmung zweier paralleler Platten untersucht werden. In Abbildung 3 sieht

22.4

man das Prinzip dieser Kapillare. Der Abstand der beiden Platten ist mit a , die Breite mit b und die Länge mit l bezeichnet. Die Kapillare soll entlang des Weges s mit dem Volumenstrom Q stationär durchströmt werden. Zwischen den Kanten der Platten bilden sich im Fall der offenen Kapillarströmung unter Schwerelosigkeit freie Oberflächen aus.

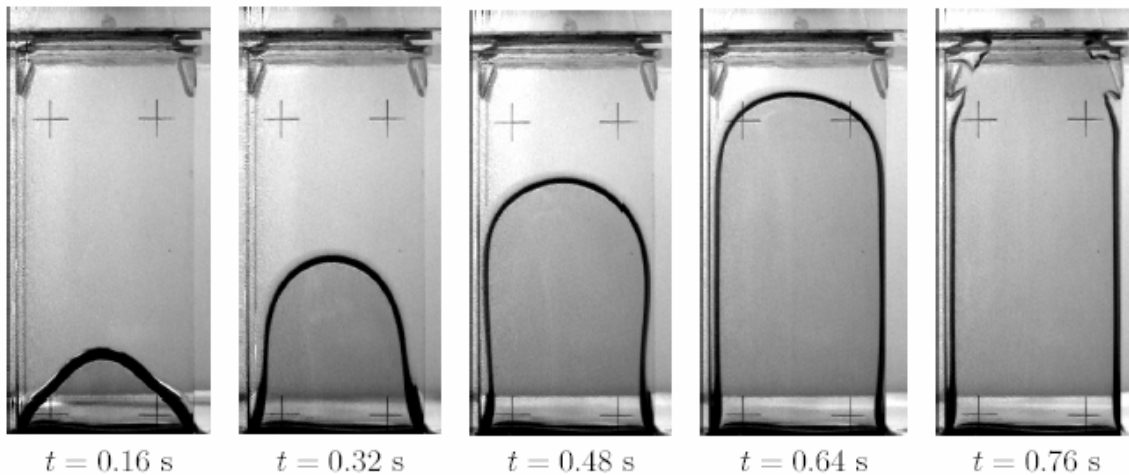


Abb.2: Zu Beginn des Experimentes steigt die Flüssigkeit allein durch die Kapillarkräfte in den Kanal hinein. Erreicht sie das „obere“ Ende, so wird mittels einer Pumpe ein geregelter Volumenstrom im Kanal realisiert [3,4,13].

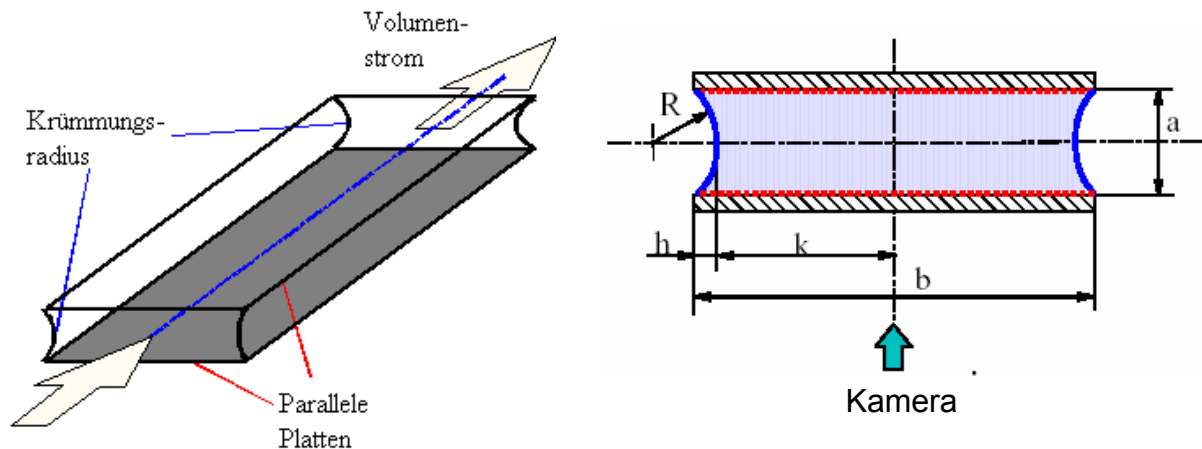


Abb. 3: Prinzip der offenen Kapillarströmung

Aufgrund der Kapillarkräfte können sie eine gewisse Druckdifferenz zwischen Innendruck p und Außendruck p_a kompensieren. Dieser als Kapillardruck bezeichnete Druck zeigt einen direkten Zusammenhang zu den Hauptkrümmungsradien R_1 , R_2 und lässt sich mittels folgender Gleichung nach Gauß-Laplace beschreiben:

$$\Delta p = p - p_a = \sigma (1/R_1 + 1/R_2)$$

Bei konstantem äußerem Druck korrespondieren die freien Oberflächen zum Innendruck der Flüssigkeit. Durch die Reibungsverluste nimmt ihre Krümmung daher entlang der Strömungsrichtung zu, wobei streng genommen speziell in Bereichen

starker Querschnittsverengungen eine Kopplung zwischen Druckverlust durch Reibung und Druckverlust durch konvektive Beschleunigung vorliegt.

Die bisherigen Versuche wurden mit kapillaren Steighilfen durchgeführt, wie sie auch in Oberflächenspannungstanks eingesetzt werden. Während des freien Falles füllt sich die Kapillare aufgrund der Oberflächenspannungskräfte mit der gut benetzenden Testflüssigkeit. Am Auslass der Kapillare ist eine Absaugvorrichtung angebracht, über die ein definierter Volumenstrom durch den Kanal entnommen werden kann.

Im nebenstehenden Bild sind verschiedene stabile Volumenströme $Q < Q_{\text{krit}}$ dargestellt. Die Flüssigkeit strömt jeweils vom unteren Bildrand nach oben durch den Kanal. Deutlich zu erkennen sind die sich verstärkenden Krümmungsradien an den offenen Seiten der Kapillare bei Erhöhung des Volumenstromes Q durch die Kapillare.

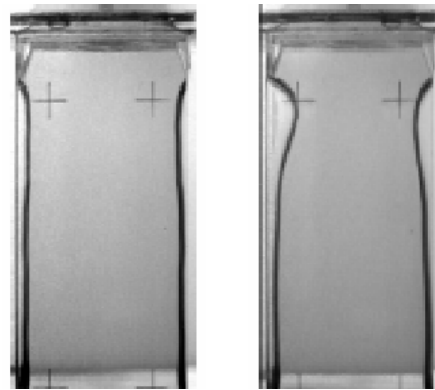


Abb. 5: $Q=8.75\text{ml/s}$ $Q=9.04\text{ ml/s}$

Dieser wird im Fallturm von Versuch zu Versuch, bei der Raketenmission aufgrund der längeren Mikrogravitationszeit von fast 6 Minuten gegenüber 4.7 Sekunden im Verlauf des Experimentes schrittweise solange gesteigert, bis der kritische Volumenstrom erreicht ist. Die freie Oberfläche kann dann dem Unterdruck nicht mehr standhalten und kollabiert; am Auslass wird Gas/Luft eingesogen. Die so ermittelten Volumenströme werden mit der Lösung einer auf die Geometrie der realen Steighilfen angepassten Differentialgleichung verglichen. Es zeigte sich, dass bereits mit einer vereinfachten Beschreibung das Problem größenordnungsmäßig richtig abgeschätzt werden kann, allerdings für die noch nicht wirklich stationären Strömungen bei den Fallturmversuchen keine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie erreicht wird.

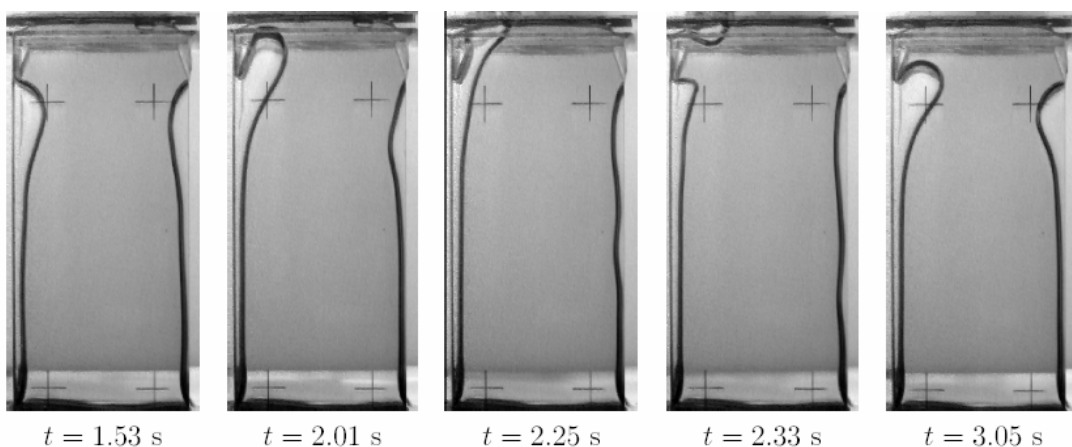
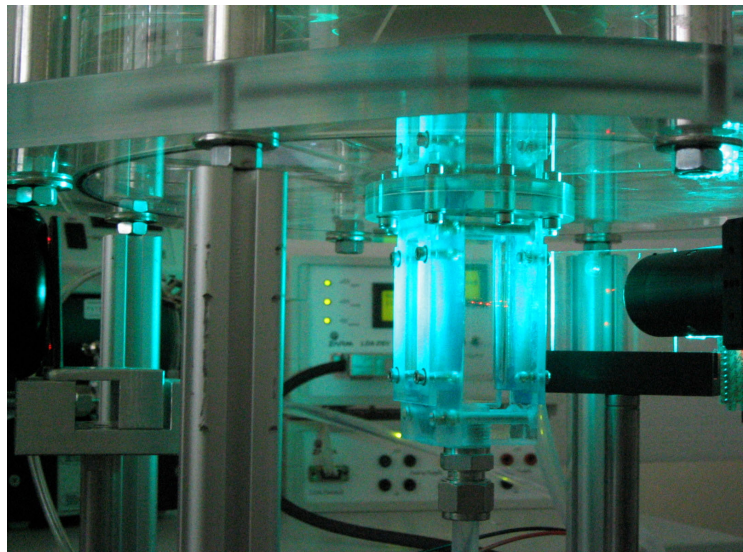
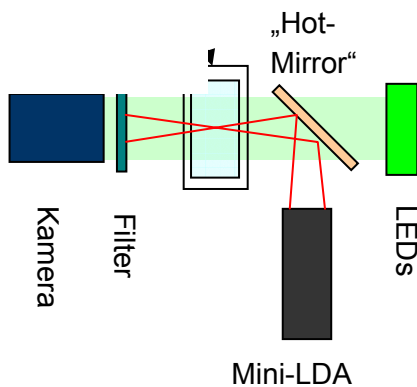


Abb. 6: Der eingestellte Volumenstrom liegt hier über Q_{krit} . Es stellt sich eine instationäre Strömung ein, Gaseinschluss erfolgt am Absaugkanal [14].

Vorversuch und Texus-Mission

Das Hauptziel der im Frühjahr 2004 startenden Texus-Mission ist die Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit für einen offenen Kapillarkanal, mit einer möglichst hohen Genauigkeit in der WEBER-Zahl $We = v / v_{krit}$. Hierzu wird die Strömung im Kanal und speziell die Krümmungsradien der freien Oberflächen mit einer hochauflösenden digitalen Kamera aufgenommen. Um diese später vermessen zu können, wird der Kanal von hinten mittels eines LED-Panels (mit Diffusor) beleuchtet. Um gleichzeitig zu der Beobachtung der Strömung auch eine LDA-Messung an ausgewählten Stellen zu realisieren, verwenden wir einen wellenlängenselektiven Spiegel, einen sogenannten Hot-Mirror. Dieser Spiegel lässt das blau-grüne Licht der LEDs ungehindert passieren, während die Strahlen des LDAs (785 nm, 50 mW), sowie auch das von den Partikeln im Messvolumen zurückgestreute Licht reflektiert wird. Für diese Mission wird an die Absaugpumpe ein hochpräziser Volumenstromsensor angeschlossen. Während des Fluges wird durch eine quasi-stationäre Erhöhung des Volumenstromes, die kritische Strömungsgeschwindigkeit im Kanal angefahren. Dabei ist außerdem geplant, durch das Verfahren des LDA-Messkopfes ein oder mehrere Geschwindigkeitsprofile aufzunehmen. Ist am Ende des Fluges noch ausreichend Zeit, soll zusätzlich noch die Größe und Häufigkeit der Blasen am Auslass vermessen werden.



Messprinzip für die Texus-Mission

Abb. 8: Aufbau des Vorversuches am Boden

Als Experiment-Flüssigkeit wurde aufgrund seiner besonders geringen Oberflächenspannung HFE-7500 ausgewählt. Zur Zeit werden erste Versuche durchgeführt, um die besten Tracerpartikel und Tracerkonzentrationen für die LDA-Messungen mit diesem Fluid zu bestimmen, sowie den Aufbau für die gleichzeitige Visualisierung zu optimieren. Hierzu werden die Daten des Volumenstromsensor, des Mini-LDAs sowie eines weiteren kommerziellen LDAs miteinander verglichen.

Literatur

- [1] Shapiro, A. H.: The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Vol. The Ronald Press Company, New York (1953).
- [2] Faber, T. E.: Fluid Dynamics for Physicists. Cambridge University Press, Cambridge (1995).
- [3] Dreyer, M., Delgado, A., Rath, H. J.: Capillary Rise of Liquid between Parallel Plates under Microgravity. *J. Colloid Interf. Sci.* 163, 158-168 (1994).
- [4] Dreyer, M.E., Rosendahl, U., Rath, H.J.: Experimental Investigation on Flow Rate Limitations in Open Capillary Vanes. AIAA 98-3165 (1998).
- [5] Sparrow, E. M., Lin, S. H.: Flow Development in the Hydrodynamic Entrance region of Tubes and Ducts. *Phys. Fluids* Vol. 7, Nr. 3, pp. 338-347 (1964).
- [6] Jaekle, D. E.: Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Vanes. AIAA-91-2172. 27th Joint Propulsion Conference, June 24-26, 1991 / Sacramento, CA (1991).
- [7] Der, J. A.: Linearised Theory for Unsteady Surface Tension Driven Flow along Supercritical Vane-Formed Fillets. AIAA-91-2175. 27th Joint Propulsion Conference, June 24-26, 1991 / Sacramento, CA (1991).
- [8] Romero, L. A., Yost, F.G.: Flow in an Open Capillary Channel. *J. Fluid. Mech.*, 322, 109-129 (1996).
- [9] White, F.: Fluid Mechanics. McGraw Hill, New York (1986).
- [10] Smits, A. J.: A Physical Introduction to Fluid Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York (2000).
- [11] Antar, B. N., Nuotio-Antar, V. S.: Fundamentals of Low Gravity Fluid Dynamics and Heat Transfer. CRC Press, Boca Raton (1993).
- [12] Lighthill, J.: Waves in Fluids. Cambridge University Press, Cambridge (1978).
- [13] Dreyer, M., Kapillarer Flüssigkeitsanstieg zwischen parallelen Platten unter kompensierter Gravitation. Dissertation Universität Bremen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7 Nr. 241, Düsseldorf: VDI-Verlag (1994).
- [14] 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).
- [15] Rosendahl, U., Ohlhoff, A., Dreyer, M. E.: Choked flows in open capillary channels: theory, experiment and computations; eingereicht beim Journal of Fluid Mechanics.