

UNTERSUCHUNG DER WANDNAHEN STRÖMUNG VON HIRNANEURYSMEN: VERGLEICH ZWISCHEN WAND-PIV UND CFD

INVESTIGATION OF THE NEAR WALL FLOW OF CEREBRAL ANEURYSMS: COMPARISON OF WALL-PIV AND CFD

André Berthe¹, Sarah Weber¹, Daniel Kondermann², Leonid Goubergrits¹, Ulrich Kertzscher¹

¹Labor für Biofluidmechanik, Charité - Universitätsmedizin Berlin, Thielallee 73, 14195 Berlin

²Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 368, 69120 Heidelberg

Aneurysma, PIV, wandnahe Scherströmung, molekulare Farbe, CFD

Aneurysm, PIV, wall shear flow, molecular dye, CFD

Zusammenfassung

Die Erfassung der wandnahen Strömung ist in der Biofluidmechanik von großer Bedeutung. Die wandnahe Strömung und auf die Wand wirkende Kräfte sind mit verantwortlich für die Ausbildung und Ruptur von krankhaften Erweiterungen der Gefäße (Aneurysmen). Untersuchungen von Strömungen und Strömungseinflüssen in Aneurysmen werden zumeist mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt. Eine messtechnische Validierung von numerisch erzielten Ergebnissen für zwei Hirnaneurysmen wurde mittels Wand-PIV an Silikon-Hohlmodellen durchgeführt. Wand-PIV ist eine Messtechnik, mit welcher Strömungen entlang gewölbter Oberflächen erfasst werden können. Die erfassten Partikelbahnen werden mittels Maximum-Minimum-Bildern visualisiert. Vektorfelder für die zwei vermessenen Aneurysmaströmungen werden mit Hilfe des optischen Flusses (Horn & Schunck 1981) berechnet. Ein Vergleich der Vektorfelder von CFD und Wand-PIV erfolgt mit Hilfe der „linear integral convolution“ (LIC). Die Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung von numerischen und experimentellen Ergebnissen.

Einleitung

Jährlich erleiden etwa 10 von 100 000 Menschen eine akute Blutung infolge der spontanen Ruptur eines Hirnaneurysmas. Die Blutströmung in Wandnähe spielt bei Entstehung, Wachstum und Ruptur von Aneurysmen eine wichtige Rolle. Langfristig wird durch patientenspezifische Untersuchung der Strömung in anatomisch realistischen Gefäßgeometrien versucht, Zusammenhänge zwischen Strömung und Rupturrisiko herzuleiten. Diese Untersuchungen basieren zumeist auf Untersuchungen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD). Eine messtechnische Validierung dieser CFD-

Untersuchungen ist für den wandnahen Bereich komplexer Geometrieformen bislang schwierig und wird aus diesem Grunde kaum durchgeführt, siehe Goubergrits 2009. Eine Möglichkeit der messtechnischen Untersuchung von wandnahen Strömungen ist die Anwendung der Wand-PIV Technik. Durch Zugabe einer molekularen Farbe zum Fluid, und der dadurch resultierenden Absorption von wandseitig eingestrahlem Licht, beschränkt diese Technik den sichtbaren Bereich von in der Strömung mitgeführten Partikeln auf die unmittelbare Wandnähe, siehe Debaene et al 2005, Kertzschner et al 2008 und Berthe et al 2009.

Ziel der hier vorgestellten Arbeit war der qualitative Vergleich zwischen numerischen Strömungsberechnungen und wandnahen Strömungsuntersuchungen mittels Wand-PIV für die Strömung in den Geometrien zweier Hirnaneurysmen. Für ein grundlegendes Verständnis der wandnahen Strömung in Untersuchungsobjekten ist es ausreichend, die beiden Koordinaten parallel zur Wand und die dazugehörigen beiden tangentialen Geschwindigkeitskomponenten zu erfassen (2D-2C). Hiermit ist es grundsätzlich möglich, die wandnahe Stagnation des Flussfeldes und somit die Anfälligkeit für Thrombenbildung und krankhafte Veränderungen der Gefäßwände abzuschätzen.

Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden an zwei Hirnaneurysmen durchgeführt, s. a. Abb. 1. Die Aneurysmen wurden mittels computertomographischer (CT) Angiographie mit einer Schichtauflösung von 512×512 Px ($0,4 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$), einer Schichtdicke von 1 mm und einer Bit-Tiefe von 16 Bit pro Pixel aufgenommen. Mit Hilfe der Software ZIB-AMIRA® wurden die Geometrien rekonstruiert. Die Rekonstruktionen dienten als Basis für die numerischen und experimentellen Strömungsuntersuchungen unter stationären Bedingungen ($Re=260$ und 330 , gebildet mit dem Durchmesser des Zulaufs).

Für die experimentellen Arbeiten wurden die rekonstruierten Geometrien mit 2,5facher und 3facher Vergrößerung mittels Rapid Prototyping mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gefertigt. Hiermit wurden wiederum negative Gussformen (Kokillen) erstellt. In den Formen erzeugte Ausgüsse aus Wood'schem Metall wurden zur Fertigung von Silikon-Hohlmodellen genutzt. Durch einen Schmelzpunkt von etwa $70 \text{ }^\circ\text{C}$ kann das Wood'sche Metall nach Verfestigung des Silikons aus den Hohlmodellen ausgeschmolzen werden. Für die Silikon-Hohlmodelle wurde Elastosil RT 601 verwendet, welches nach Aushärtung weitgehend starr ist und sehr gute optische Eigenschaften (Transparenz) bei einem Brechungsindex von $n=1,4$ aufweist. Die rekonstruierten Geometrien und die daraus erstellten Silikonmodelle der zwei Aneurysmen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Als Fluid wurde ein Wasser-Glyzerin-Gemisch mit einem Mischungsverhältnis von 37,5 Vol-% Glyzerin (99,5%, CVH, Hannover, Deutschland) zu 62,5 Vol-% Wasser (destilliert) verwendet. Die kinematische Zähigkeit der Mischung beträgt $3,47 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei einer Temperatur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Zähigkeit von Blut bei $37 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt zwischen $2,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ und $5,6 \text{ mm}^2/\text{s}$, siehe Dintenfass 1971 sowie Geigy 1960. Die Abhängigkeit der Blutviskosität von der Scherrate wird durch das Modellfluid nicht nachgebildet. Das Glyzerin-Wasser-Gemisch wurde mit 0.3 g/l Patentblau V (E131, Schumann & Sohn GmbH, Karlsruhe, Deutschland) angefärbt, die Oberflächenspannung mit Tween 80 (E 433, Merck KGaA, Darmstadt, Deutschland) herabgesetzt. Durch den Farbstoff wurde die Eindringtiefe des Lichtes auf $300 \text{ }\mu\text{m}$ beschränkt.

Eine durch eine Verdrängerpumpe erzeugte stationäre laminare Strömung von 600 ml/min in den vergrößerten Modellen entspricht bei Anwendung der Reynolds-Analogie den physiologischen Bedingungen von 200 ml/min in der für diese Aneurysmen relevanten internen Halsschlagader, siehe zum Beispiel Scheel et al 2000 oder Kato et al 2002. Dieser Volumenstrom wurde durch eine partikelschonende Kolbenpumpe erzeugt, die speziell für Wand-PIV-Anwendungen im Labor für Biofluidmechanik entwickelt wurde. Durch einen starren, waagerechten Zulauf wurden an den Aneurysmeneingängen parabolische Zulaufprofile erzeugt.

Eine Untersuchung von Strömungen in der Nähe von gewölbten Wänden wurde durch die Wand-PIV-Technik ermöglicht. Im Gegensatz zu konventionellem PIV erfolgt bei dieser Technik die Beleuchtung von reflektierenden Tracern nicht mit einem Laserschnitt sondern durch eine monochromatische, frontale Beleuchtung des transparenten Modells. Durch Zumischung eines molekularen Farbstoffs zum Modellfluid kann die Eindringtiefe des Lichts auf einen wandnahen Bereich begrenzt werden.

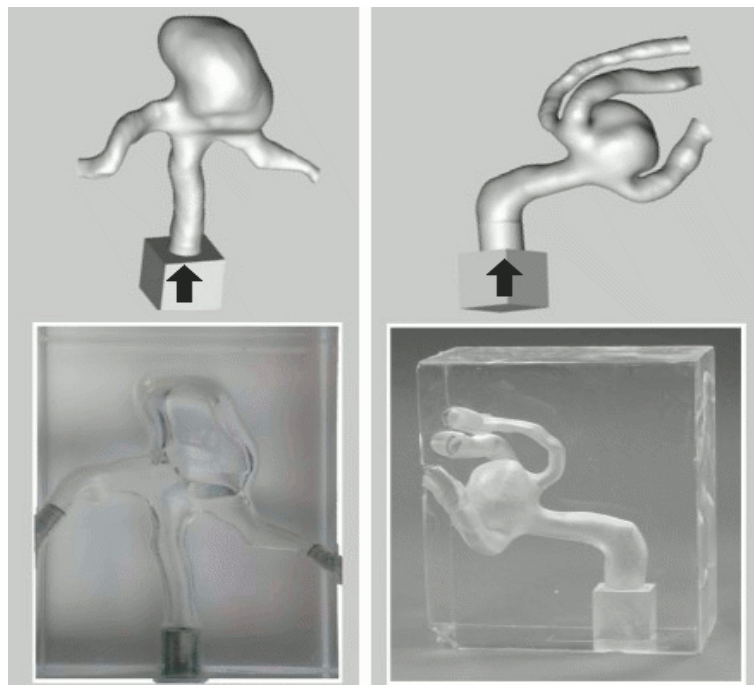


Abb. 1: Rekonstruierte Geometrien (oben) und Silikon-Hohlmodelle (unten) der zwei untersuchten Aneurysmen. Auf der linken Seite ein Modell mit zwei Ausgängen, welches im Maßstab 1:2,5 angefertigt wurde und auf der rechten Seite ein Modell mit drei Ausgängen, im Maßstab 1:3.

Dem Fluid wurden Partikel vom Typ Conduct-o-fil AGSL 150-30 TDR (Potters Industries Inc., Carlstadt, USA) zugesetzt. Mittels Sieben mit 71 μm und 75 μm Maschenweite wurde annähernd Monodispersion erreicht. Die Bewegung der wandnahen Partikeln wurde mit einer Fastcam-Super 10K (Photron, Tokyo, Japan) bei 250 fps aufgenommen. Für jedes Aneurysma wurden drei oder vier Blickrichtungen untersucht. Die Analyse der erzeugten Bildsequenzen erfolgte mit dem globalen optischen Fluss Verfahren von Horn und Schunck, siehe Horn 1981.

Zusätzlich wurden CFD-Berechnungen der Strömung in den Aneurysmen mit der Software FLUENT 6[®] (ANSYS-Fluent Inc., Lebanon, USA) durchgeführt und die wandnahe Strömung

analysiert. Diese numerischen Untersuchungen beruhen auf Geometrien, welche identisch zu den bei den experimentellen Arbeiten verwendeten Hohlmodellen skaliert waren. Die Gittererstellung wurde mit Gambit® (ANSYS-Fluent Inc., Lebanon, USA) durchgeführt. Die Oberfläche wurde hierbei mit einem Dreiecksgitter mit einem Knotenabstand von 1:20 des mittleren Gefäßdurchmessers vernetzt. Das Volumen wurde durch Tetraeder abgedeckt. Zur höheren Auflösung des Wandbereichs wurde dieser mit drei feinen Schichten vernetzt, wobei die Schichtdicke mit zunehmendem Wandabstand um den Faktor 1,2 erhöht wurde.

Das Modell wurde als starr angenommen und eine Haftbedingung für alle Wandflächen angesetzt. Das Fluid wurde entsprechend den Bedingungen in den experimentellen Arbeiten als newtonisches Fluid mit einer kinematischen Viskosität von $3,47 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei einer Raumtemperatur von 24 °C angesetzt. Dem Zulauf wurde über eine benutzerdefinierte Funktion (UDF) in Fluent ein parabolisches Profil aufgeprägt.

Bei einer Diskretisierung zweiter Ordnung mittels Aufwind-Schema wurde das SIMPLEX-Verfahren zur Druckkorrektur verwendet. Eine Konvergenz der Simulation wird für relative Fehler von Geschwindigkeiten und Druck von 10^{-4} angenommen und an drei ausgewählten Punkten kontrolliert.

Ergebnisse

Die berechneten Vektorfelder wurden für experimentelle Messdaten und numerische Berechnungen als „linear integral convolution“ (LIC, siehe Stalling 1995) Bilder visualisiert. Hierbei wurden die numerischen Ergebnisse auf die Oberfläche der berechneten Modelle projiziert, um einen besseren Eindruck der Strömung zu vermitteln. Da für die Wand-PIV Messungen keine geschlossenen Flussfelder entlang der gesamten Oberfläche der Aneurysmen vorliegen, werden die Ergebnisse direkt für die vermessenen Blickrichtungen wiedergegeben.

Die Ergebnisse von CFD und Wand-PIV ermöglichen die Ermittlung von charakteristischen Strömungsstrukturen und kritischen Punkten (Knoten, Sattel- und Staupunkte). Weiterhin erfolgte eine Visualisierung der Partikelbahnen durch Maximum-Minimum-Bilder.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Strömungsuntersuchungen des Aneurysmas mit drei Ausgängen (von oben links entgegen dem Uhrzeigersinn):

- experimentell ermittelte Partikelbahnen, die durch Maximum-Minimum-Bilder visualisiert wurden,
- das Vektorfeld und
- die LIC-Darstellung des experimentell ermittelten Vektorfeldes und
- die LIC-Darstellung der CFD-Berechnungen

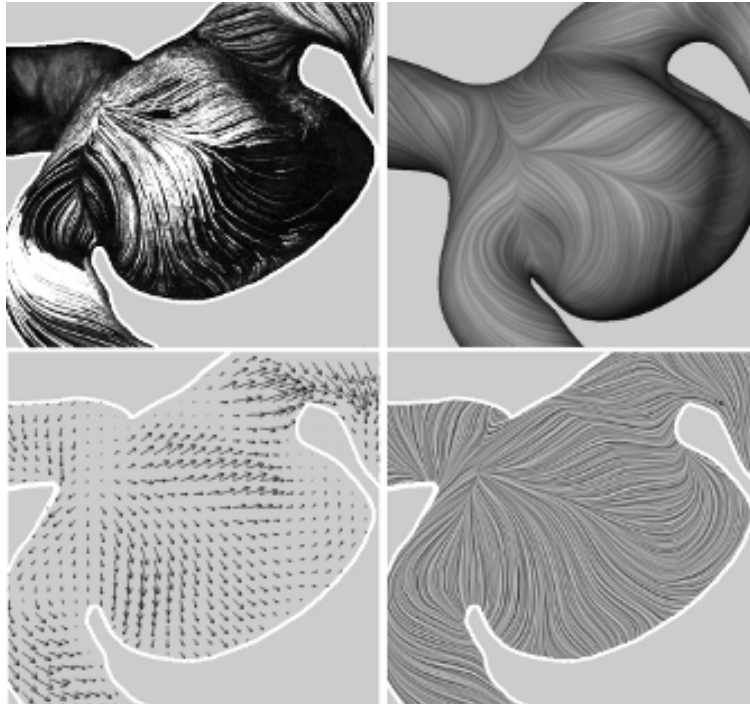


Abb. 2: Gegenüberstellung von Maximum-Minimum-Bild eines Aneurysmas mit drei Ausgängen (links oben), daraus errechnetem Vektorfeld (links unten), dem resultierenden LIC (rechts unten) und dem direkten Vergleich mit dem LIC der zugehörigen CFD-Berechnung (rechts oben).

Das in Abbildung 2 oben links wiedergegebene Maximum-Minimum-Bild gibt gut die komplexe Strömung im Aneurysma wieder. Hierbei ist anzumerken, dass die Partikelbahnen im Zulaufbereich schlecht zu erkennen sind, da sie sich außerhalb des Schärfentiefebereichs (von 28 mm) befinden. Der Vergleich zwischen numerischen und experimentellen Daten zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Wand-PIV und CFD. Hierbei fällt wiederum eine Abweichung im Bereich des Zustroms auf. Es lässt sich also festhalten, dass die Anwendung der Wand-PIV-Technik einen guten Vergleich zu numerischen Berechnungen ermöglicht, wobei bei der Beurteilung von Abweichungen auf die Aufnahmequalität zu achten ist.

Die Darstellung der Aneurysma mit zwei Ausgängen mit Hilfe der gleichen Methoden ist in Abbildung 3 wiedergegeben. Die Partikelbahnen zeigen, dass kritische Punkte (Stagnationspunkte und Sattelpunkte) sowie die Konvergenz und Divergenz der Strömung gut nachvollzogen werden können. Der Vergleich von Simulation und Messung anhand der LIC-Darstellungen zeigt eine große Übereinstimmung, wobei durchaus auch Unterschiede wie im Bereich des unteren Ausgangs festgestellt werden können. Hierbei stellt sich die Frage, ob es sich um Fehler in den angenommenen Randbedingungen handelt oder ob die voneinander abweichenden kritischen Punkte als instabil angenommen werden müssen. Da Letzteres auch bei leichten Änderungen der durch CFD untersuchten Modelleigenschaften einen Einfluss hätte, werden hierzu zurzeit weitergehende Untersuchungen durchgeführt.

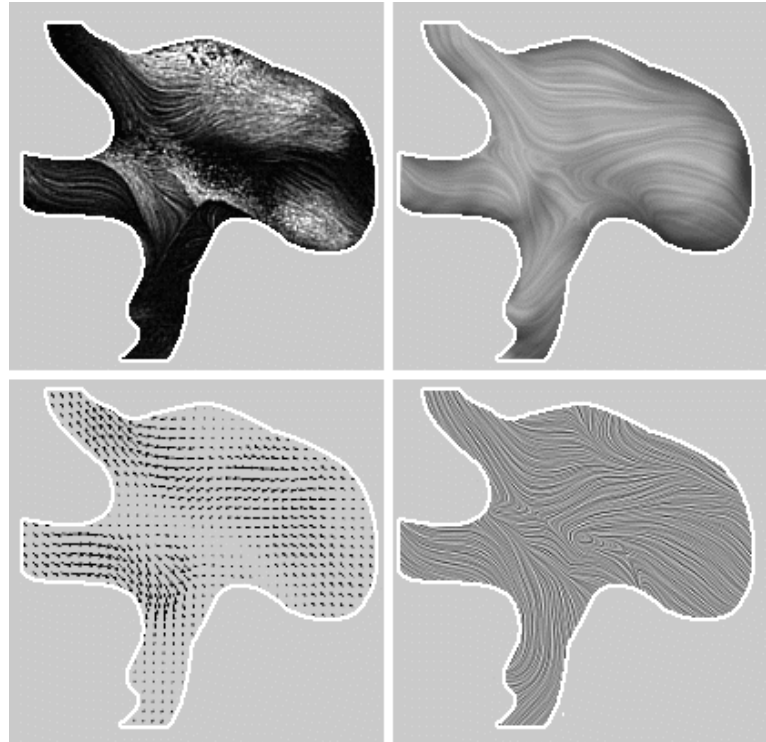


Abb. 3: Gegenüberstellung von Maximum-Minimum-Bild eines Aneurysmas mit zwei Ausgängen (links oben), daraus errechnetem Vektorfeld (links unten), dem resultierenden LIC (rechts unten) und dem direkten Vergleich mit dem LIC der zugehörigen CFD-Berechnung (rechts oben).

Diskussion und Ausblick

Die wandnahe Strömung in zwei Aneurysmamodellen wurde mittels Wand-PIV experimentell und unter den gleichen Randbedingungen numerisch untersucht. Die experimentellen Untersuchungen wurden in transparenten Silikon-Hohlmodellen durchgeführt, während die numerischen Berechnungen mit Hilfe des CFD Programms FLUENT realisiert wurden. Für beide Ansätze wurde ein newtonisches Fluid mit angenäherter Blutviskosität verwendet. Die experimentellen Ergebnisse beider untersuchter Aneurysmamodelle zeigen, dass die Wand-PIV-Technik sich zur Analyse und Charakterisierung der wandnahen Strömung in Aneurysmen eignet. Der Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen verdeutlicht, dass die vorliegende Übereinstimmung zwischen beiden Untersuchungsarten mit der gewählten LIC-Visualisierung gut nachvollzogen werden kann. Bei den Untersuchungen festgestellte Abweichungen von einigen kritischen Punkten lassen die Frage aufkommen, ob eine Unterscheidung zwischen stabilen und instabilen Punkten notwendig ist. Hierzu werden zurzeit weitere Arbeiten durchgeführt. Weiterhin sollen Strömungsuntersuchungen mittels Wand-PIV durchgeführt werden, die numerisch nur schwer zu realisieren sind. Diese sind beispielsweise Strömungseinflüsse von Drähten, die in Aneurysmen zur medizinischen Behandlung eingebracht werden.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung der durchgeführten Arbeiten im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 und des DFG-Projektes KE 900/9-1.

Literatur

- Berthe, A., Kondermann, D., Garbe, Ch., Affeld, K., Jähne, B., Kertzscher, U., 2009: "The Wall-PIV Measurement Technique for Near Wall Flow Fields in Biofluid Mechanics", Imaging Measurement Methods for Flow Analysis, Springer, XXII, pp. 11-20
- Debaene, P., Kertzscher, U., Goubergrits, L., Affelt, K., 2005: "Visualization of a Wall Shear Flow: Development of a New Particle Image Interrogation Method", Journal of Visualization, No. 8, pp. 285-364
- Dintenfass, L., 1971: "Blood Microrheology – Viscosity Factors in Blood Flow, Ischaemia and Thrombosis", Butterworths
- Geigy, J.R., 1960: "Documenta Geigy, Wissenschaftliche Tabellen", Geigy
- Goubergrits, L., Weber, S., Petz, Ch., Hege, H-Ch., Spuler, A., Poethke, J., Berthe, A., Kertzscher, U., 2009: "Wall-PIV as a Near Wall Flow Validation Tool for CFD", Journal of Visualization, No. 12 (3), pp. 241-250.
- Horn, B. and Schunck, B., 1981: "Determining Optical Flow", Artificial Intelligence, 17, pp. 185-204
- Kato, T., Indo, T., Yoshida, E., Iwasaki, Y., Sone, M., Sobue G., 2002 "Contrast-Enhanced 2D Cine Phase MR Angiography for Measurement of Basilar Artery Blood Flow in Posterior Circulation Ischemia", Am. J. Neuroradiol., No. 23, pp. 1346-1351
- Kertzscher, U., Berthe, A., Goubergrits, L., Affeld, K., 2008: "Particle image velocimetry of a flow at a vaulted wall", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 222, No. 4, pp. 465-473
- Scheel, P., Ruge, Ch., Petruch, U.R., Schöning M., 2000: "Color Duplex Measurement of Cerebral Blood Flow Volume in Healthy Adults", Stroke, No. 31, pp. 147-150
- Stalling, D., Hege, H.-Ch., 1995: "Fast and resolution independent line integral convolution", Proceedings of the 22nd annual conference on computer graphics and interactive techniques, pp. 249-256