

3D Bildgebung von zerebralen Aneurysmen

Vergleich zwischen CT und MRT

Leonid Goubergrits¹, Jens Pöthke¹, Christoph Petz², Hans-Christian Hege²,
Andreas Spuler³, Ulrich Kertzscher¹

¹Labor für Biofluidmechanik, Charité–Universitätsmedizin Berlin

²Visualization and Data Analysis, Konrad Zuse Institute Berlin

³Neurochirurgie, Helios Klinikum Berlin–Buch

leonid.goubergrits@charite.de

Kurzfassung. Patientenspezifische Strömungs- und die Geometrieanalyse von Aneurysmen basiert auf der 3D-Rekonstruktion aus Daten, die mit modernen Methoden der Bildgebung (z.B. CT und MRT) gewonnen werden. Die unterschiedlichen Charakteristika der Bildgebungsverfahren und die damit verbundenen Unsicherheiten führen zu Variationen der rekonstruierten Geometrien, die sich auf die numerische Berechnung von Strömungsparametern, wie z.B. die Wandschubspannung, auswirken können. Basierend auf CT- und MRT-Aufnahmen eines anatomisch realistischen Referenzmodells eines zerebralen Aneurysmas der Arteria Basilaris vergleichen wir die rekonstruierten Geometrien und die hierin simulierten Blutströmungen. Die Segmentierung und Rekonstruktion des Aneurysmas erfolgte mit Hilfe des Programms AMIRA. Die numerischen Strömungsberechnungen wurden mit dem Strömungslöser FLUENT durchgeführt.

1 Einleitung

Zerebrale Aneurysmen sind lebensgefährlich. Jährlich erleiden etwa 10 von 100.000 Menschen eine akute Blutung infolge der spontanen Ruptur eines Aneurysmas mit einer Sterberate von etwa 50% [1]. Die Abschätzung der Rupturwahrscheinlichkeit und die Entscheidung über die Therapieart sind von der im Aneurysma vorliegenden Blutströmung und von deren Geometrie abhängig. Die modernen Methoden der Bildgebung (z.B. CT, MRT und Rotationsangiographie) zusammen mit den Methoden der 3D-Rekonstruktion ermöglichen uns eine patientenspezifische Analyse der Gefäßgeometrie. Aktuelle Verfahren der numerischen Strömungssimulation erlauben jetzt, die Blutströmung im Aneurysma und in dessen Umgebung zu berücksichtigen. Die Rekonstruktion der Geometrie ist der Schlüssel zur in-vivo Erfassung biofluidmechanischer Parameter der Aneurysmen. Die verschiedenen Methoden der Bildgebung haben jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile, unterschiedliche Auflösungen und eine unterschiedliche Anwendungshäufigkeit in der klinischen Praxis. Keine dieser Methoden kann man als Goldstandard betrachten. Für die Etablierung eines numerischen Modells

der Aneurysmenströmung, sowie für das Erfassen geometrischer Parameter müssen die Auswirkungen der verschiedenen Bildgebungsmethoden bei der Geometrierekonstruktion von zerebralen Aneurysmen untersucht werden. Eine weitere Fragestellung ist die Untersuchung der Auswirkungen der Geometrieabweichungen auf die Charakterisierung der Aneurysmen hinsichtlich biofluidmechanischer Parameter. Bis jetzt sind solche Untersuchungen nur für Karotidverzweigungen durchgeführt worden [2, 3]. Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen den rekonstruierten Geometrien und einem relevanten Strömungsparameter, der Wandschubspannung (WSS), basierend auf einer CT- und einer MRT-Aufnahme eines Silikonmodells eines Aneurysmas der Arteria Basilaris.

2 Material und Methoden

2.1 Rekonstruktion und Fertigung des Silikonmodells

Eine 68-jährige Frau wurde für eine chirurgische Operationsplanung mit CT-Angiographie untersucht. Die CT-Aufnahme bestand aus 2 mm dicken Schichten in einem Abstand von 1 mm, bei einer Auflösung von 512x512 Pixel (0,4 mm x 0,4 mm Pixelgröße). In der Aufnahme war ein Aneurysma der Arteria Basilaris erkennbar. Diese Rohdaten wurden mit dem Programm AMIRA [4] segmentiert, und die Geometrie des Aneurysmas wurde rekonstruiert (Abb. 1 links). Der Durchmesser des Muttergefäßes betrug 3,8 mm. Die rekonstruierte Geometrie dient in dieser Arbeit als Goldstandard für unsere vergleichende Untersuchung und wurde für die Herstellung eines dreifach vergrößerten Silikonmodells verwendet. Zuerst wurde das Modell stereolithographisch mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erstellt, anschließend wurde daraus ein Hohlmodell aus Zweikomponentensilikon ELASTOSIL® RT 601 (Wacker-Chemie GmbH, München, Deutschland) gefertigt (Abb. 1 rechts).

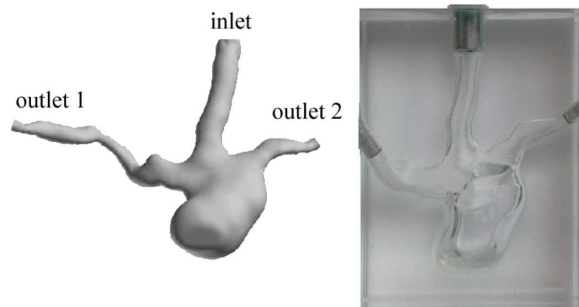
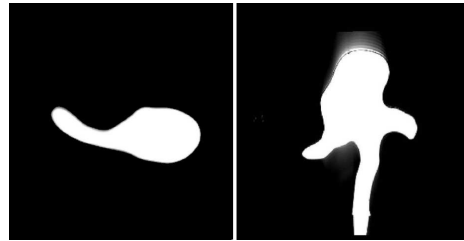


Abb. 1. Computermodell eines rekonstruierten Aneurysmas (links); dreifach vergrößerte Silikonmodell (rechts)

Abb. 2. CT-Schicht des aufgenommenen Aneurysmenmodells (links); Schicht aus der MRT-Aufnahme des Aneurysmenmodells (rechts). Die Aufnahme zeigt das Ringing-Problem der MRT Bildgebung



2.2 CT und MRT basierende 3D-Rekonstruktion des Silikonmodells

Das Silikonmodell des Aneurysmas wurde mit CT- und MRT-Bildgebung aufgenommen. Das vergrößerte Modell ermöglichte eine Aufnahme mit hoher räumlicher Auflösung unter idealen Randbedingungen (hoher Kontrast, keine Bewegungsartefakte). Die CT-Aufnahme wurde mit einem Siemens Volume Zoom Scanner (4-Zeiler) durchgeführt (115 Schichten, 1,8 mm Schichtdicke und 0,9 mm Schichtenabstand). Dieses ergab eine Voxelgröße von 0,39 mm x 0,39 mm x 0,9 mm für das Silikonmodell, was einer Voxelgröße von 0,13 mm x 0,13 mm x 0,3 mm der in-vivo Größe des Aneurysmas entspricht. Abb. 2 links zeigt die Aufnahme einer CT-Schicht. Die Rekonstruktion des Aneurysmas erfolgte aufgrund hoher Kontrast halb-automatisch mittels Segmentierungs- und Schwellwertwerkzeugen des Programms AMIRA mit anschließender Glättung (Abb. 3 Mitte).

Die MRT-Aufnahmen wurden mit einem Philips Achiva-3-Tesla Gerät und einer 8 Kanal SENSE Kopfspule und Anwendung der 3D-Spin-Echo-Sequenz durchgeführt. Es ergab eine räumliche Auflösung von 0,48 x 0,48 x 0,48 mm³, das in-vivo einer räumlichen Auflösung von 0,16 x 0,16 x 0,16 mm³ entspricht. Abb. 2 rechts zeigt die MRT-Aufnahme eines Schnittes. Abb. 3 rechts zeigt eine mit dem Programm AMIRA rekonstruierte 3D-Geometrie. Auch hierzu wurden Segmentierungs- und Schwellwertwerkzeuge mit anschließender Glättung eingesetzt.

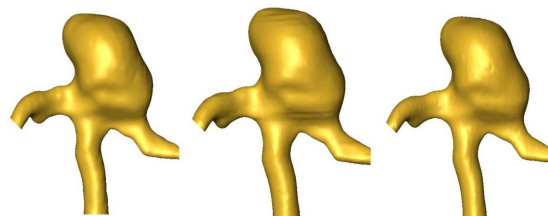


Abb. 3. Ursprüngliche Rekonstruktion als Goldstandard (links); CT-basierte Rekonstruktion (Mitte); MRT-basierte Rekonstruktion (rechts)

2.3 Numerische Strömungsberechnungen

Für die Berechnung des Strömungsverhaltens im Aneurysma mit der Finite Elemente Methode wurde zunächst ein Volumengitter der Geometrie erzeugt. Dazu wurde ein Oberflächengitter mit etwa 50.000 Dreiecken generiert, daran angrenzend ein Grenzschichtgitter bestehend aus drei Schichten Prismen in einer Gesamtdicke von 0,2 mm, wobei die Dicke der ersten Zellschicht nur 0,01 mm beträgt. Diese hohe wandnahe Auflösung wird für die Erfassung der Wandschubspannung (WSS) benötigt. Anschließend wurde das innere Gitter mit etwa 600.000 Tetraedern aufgefüllt. Die Berechnung der 3D Navier-Stokes Gleichungen auf den Gitterpunkten mit einem stationären Volumenstrom von 200 ml/min wurde mit dem Strömungslöser Fluent durchgeführt, aus dessen Ergebnissen die WSS bestimmt wurde.

3 Ergebnisse

3.1 Geometrie

Die rekonstruierten Geometrien aus den CT- und MRT-Aufnahmen wurden mit der Geometrie des Goldstandards verglichen. Dabei wurden die Oberflächenabstände der rekonstruierten Geometrien zu dem Goldstandard berechnet (Hausdorff-Abstand). Abb. 4 zeigt die Verteilungen der Oberflächenabstände. Die linke Abbildung zeigt den Vergleich der CT-basierten Geometrie. Der mittlere Hausdorff-Abstand beträgt, auf Aneurysmengröße skaliert, 0,242 mm. Die rechte Abbildung zeigt die Abstandsverteilung der MRT-basierten Geometrie. Der mittlere auf Aneurysmengröße skalierte Hausdorff-Abstand entspricht hier 0,097 mm.

3.2 Wandschubspannung

Die berechnete mittlere WSS des Goldstandards beträgt 4,02 Pa. Eine um 24% niedrigere mittlere WSS von 3,06 Pa wurde für die CT rekonstruierte Geometrie errechnet. Die MRT-basierte Geometrie ergab eine um 10% geringere mittlere WSS von 3,62 Pa. Die Wandschubspannungsverteilung zeigt sehr ähnliche Muster (Abb. 5).

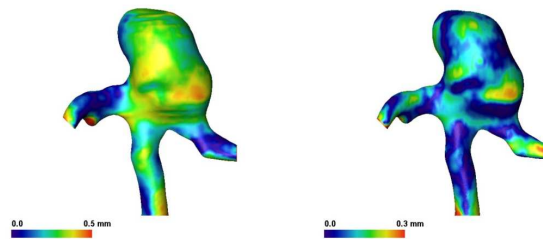
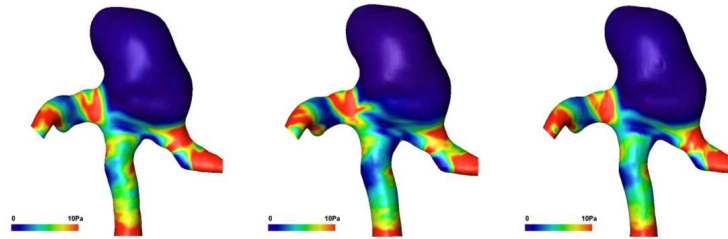


Abb. 4. Farbcodierte Darstellung der Hausdorff Oberflächenabstände zwischen der Ausgangsgeometrie und CT- (links) und MRT-basierten (rechts) Geometrie

Abb. 5. Wandschubspannungsverteilungen über die Oberfläche errechnet aus verschiedenen Geometrien: Ausgangsgeometrie (links); CT-basiert (Mitte); MRT-basiert (rechts)



4 Diskussion

Ein dreifach vergrößertes Silikonmodell eines Aneurysmas der Arteria Basilaris wurde mit zwei bildgebenden Verfahren (MRT und CT) aufgenommen und rekonstruiert. Mittels numerischer Strömungssimulationen wurden in beiden Rekonstruktionen und in der Ausgangsgeometrie die Verteilungen der Wandschubspannungen berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Verfahren geeignet sind, um die Form von zerebralen Aneurysmen mit den Gefäßen zu rekonstruieren. Sie können deshalb in klinisch relevanten Studien zur patientenspezifischen Risikoanalyse von Aneurysmen angewendet werden. Bei der gleichen Aufnahmeauflösung weist die MRT-basierte Rekonstruktion einen 2,5-fach niedrigeren Fehler als die CT-basierte Rekonstruktion auf. Die CT-basierte Rekonstruktion zeigt bekannte Artefakte in der Form von Stufen, die zu Fehlern der Oberflächenkrümmung führen. Trotz unterschiedlichen Abweichungen von der Originalgeometrie fanden wir für beide Simulationen eine gute Übereinstimmung bei der Ermittlung von Wandschubspannungen. Demnächst soll ein drittes Verfahren, 3D-Rotationsangiographie, mit der gleichen Methode untersucht werden.

Literaturverzeichnis

1. Wiebers DO, Whisnant JP, Huston J, et al. Unruptured intracranial aneurysms: Natural history, clinical outcome, and risks of surgical and endovascular treatment. *Lancet*. 2003;362(9378):103–10.
2. Glor FP, Ariff B, Hughes AD, et al. Image-based carotid flow reconstruction: A comparison between MRI and ultrasound. *Physiol Meas*. 2004;25(6):1495–1509.
3. Birchall D, Zaman A, Hacker J, et al. Analysis of haemodynamic disturbance in the atherosclerotic carotid artery using computational fluid dynamics. *Eur Radiol*. 2006;16(5):1074–83.
4. Stalling D, Westerhoff M, Hege HC. In: Hansen CD, Johnson CR, editors. *Amira: A Highly Interactive System for Visual Data Analysis*. Elsevier; 2005. p. 749–67.