

Entwurf einer angepassten Visualisierung von zerebralen Aneurysmen mit innenliegenden Blutflussinformationen

R. Gasteiger¹, M. Neugebauer¹, V. Diehl², O. Beuing³, B. Preim¹

¹ Institut für Simulation und Graphik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

² MR- und PET/CT-Zentrum Bremen, Deutschland

³ Institut für Neuroradiologie, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

Kontakt: rocco.gasteiger@ovgu.de

Abstract:

Für die Untersuchung und gezielte Interventionsplanung von zerebralen Aneurysmen wird zunehmend deren Morphologie im Zusammenhang mit dem Blutflussverhalten untersucht. Dazu werden Geometriedaten der Aneurysma-Oberfläche mit Flussinformationen aus einer Simulation oder Messung in eine gemeinsame eingebettete Oberflächenvisualisierung zusammengefügt und anschließend exploriert. Die auftretenden Verdeckungen und die hohe Komplexität der kombinierten Darstellung von äußerer Geometrie und innerem Fluss stellt eine Herausforderung an die Visualisierung dar. In einer kürzlich erschienenen Arbeit wurde bereits eine angepasste Oberflächenvisualisierung der Aneurysmageometrie vorgestellt, die die Verdeckung auf die innenliegenden Flussvisualisierungen reduziert. Aufbauend darauf beschreibt die vorliegende Arbeit erste konzeptionelle Ansätze, wie die Visualisierung im Bereich des Aneurysmas so angepasst werden kann, dass eine effiziente visuelle Exploration der Strömung an dieser Stelle möglich ist.

Schlüsselworte: Aneurysma, Geometrische Modellierung, Oberflächenvisualisierung, Flussvisualisierung

1 Problem

Die Entstehung, das Wachstum sowie die gezielte Behandlung von zerebralen Aneurysmen sind schon seit langem Gegenstand der neurovaskulären Forschung [1,2]. Ein wichtiger Untersuchungsgegenstand ist dabei die Modellierung und gezielte Beeinflussung des Blutflusses im betroffenen Gefäßsystem [3,4]. Neben der Gefäßoberfläche werden dazu auch Strömungsinformationen durch Blutflussmessungen, hauptsächlich jedoch durch Simulationen akquiriert. Aufgrund der Abhängigkeit des Blutflusses von der umgebenden Morphologie müssen Strömungs- und Oberflächeninformationen kombiniert in einer sogenannten eingebetteten Oberflächenvisualisierung dargestellt werden. Die aufgrund der umschließenden Aneurysmaoberfläche auftretende Verdeckung der innenliegenden Strömung wurde in einer kürzlich erschienenen Arbeit [5] diskutiert und durch einen neuen Visualisierungsansatz reduziert. Zusätzlich wurden Tiefenhinweise bezüglich der Oberflächendarstellung integriert. Abb. 1a zeigt die neue, angepasste Visualisierung gegenüber der in Abb. 1b verwendeten Standardvisualisierung mittels semitransparenter Oberfläche. Die Blutflussinformation ist dabei durch *Streamlines* dargestellt.

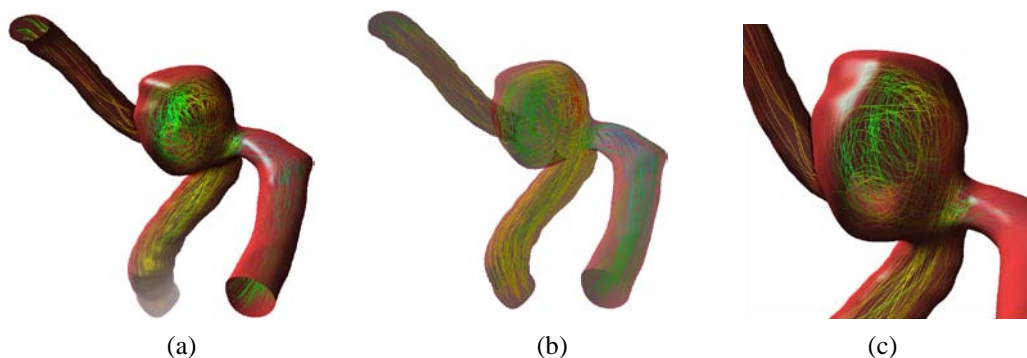


Abb. 1: (a) Angepasste Oberflächendarstellung des Aneurysmas aus [5], (b) Standardvisualisierung mittels semitransparenter Darstellung, (c) Nahaufnahme des Aneurysma-Sackes mit komplexem, innenliegenden Strömungsmuster. Die Blutflussinformationen sind jeweils durch farbkodierte *Streamlines* visualisiert.

Streamlines sowie andere geometriebasierte Visualisierungen stellen dabei bewährte Techniken für die Darstellung von globalen 3D Flussinformationen dar [6, 7]. Aufgrund von Überlagerungen und der hohen räumlichen Dichte der Graphikprimitive (z.B. Linien, Glyphen) können die Visualisierungen jedoch eine hohe Komplexität aufweisen, wie dies beispielsweise in Abb. 1c erkennbar ist. Existierende Verfahren reduzieren diese Komplexität durch Filterung bzw. Reduktion der Strömungsdaten auf relevante skalare oder räumliche Bereiche sowie durch Hinzufügen von visuellen Tiefenhinweisen wie Schattierungen oder atmosphärischen Abschwächungen. Im Anwendungsfall von zerebralen Aneurysmen besteht eine angepasste Strömungsvisualisierung bisher nur auf eine 2D-Abbildung von wandnahen Strömungsparametern [8, 9]. Obwohl diese räumliche Reduktion die Bewertung der Aneurysmawand vereinfacht, geht dabei der räumliche Bezug zur innenliegenden Strömung verloren. Zudem erfolgt keine lokale Anpassung der Visualisierung im Bereich des Aneurysmas, obwohl dort das Strömungsverhalten besonders relevant ist. Speziell interessiert den Neuroradiologen das Flussverhalten am Einströmbereich (*Ostium*) sowie der Gefäßwand des Aneurysmas ist. Daraus lassen sich beispielsweise Erkenntnisse über die Verweildauer des Blutes (*Turn-Over-Time*) im Aneurysma sowie Ursachen für die Wandbelastung, wie z.B. hohe Geschwindigkeiten oder Verwirbelungen, gewinnen. Die vorgestellte Arbeit beschäftigt sich daher mit ersten Konzepten für eine angepasste Strömungs- und Oberflächenvisualisierung von zerebralen Aneurysmen. Der Beitrag grenzt sich durch seine lokale Anpassung von den existierenden, globalen Ansätzen ab.

2 Methoden

Grundlage der hier vorgestellten Visualisierungsansätze sind das polygonale Oberflächenmodell des Aneurysmas, die *Centerline C* des Trägergefäßes sowie simulierte Flussdaten im Inneren des Aneurysmas [10]. Die Oberflächen wurden dabei in einem Vorverarbeitungsschritt aus patientenspezifischen MRA oder CTA-Datensätzen rekonstruiert. Die Segmentierung der entsprechenden Gefäßabschnitte erfolgte jeweils durch ein schwellenwertbasiertes Verfahren mit anschließender Zusammenhangskomponentenanalyse. Basierend auf der resultierenden Segmentierungsmaske wurde das Oberflächenmodell durch Anwendung des *Marching Cubes*-Algorithmus erzeugt. Die Dreiecksqualität wurde abschließend durch ein *Remeshing* optimiert [11]. Die *Centerline* wird mithilfe des Voronoi-Diagramms aus der Oberfläche berechnet [12]. Das Akquirieren der Flussdaten erfolgt anschließend durch CFD-Simulationen [3]. Jedoch können die Flussdaten auch aus zeitaufgelösten Phasen-Kontrastaufnahmen entstehen, wie sie beispielsweise in [13, 14] beschrieben werden.

Im Folgenden erfolgt die lokale Anpassung der Visualisierung des Aneurysmas und den darin enthaltenen Blutflussdaten in vier konzeptionellen Schritten: Rekonstruktion des Einströmbereiches, Definition einer Fokusregion, Reduktion der Flussdarstellung und Hinzufügen von Tiefenhinweisen.

2.1. Rekonstruktion des Einströmbereiches (*Ostiums*)

Für die angepasste Visualisierung am Aneurysma muss für dieses zunächst ein lokaler Bezugsrahmen zum übrigen Gefäßsystem erzeugt werden. Dieser Bezugsrahmen ist notwendig, um das Aneurysma sowie die zu- und abführenden Gefäßsysteme in eine Fokus- und Kontextregion zu unterteilen. Jede Region kann dann individuell visualisiert werden. Für den Bezugsrahmen wird zunächst die *Ostium*-Fläche semi-automatisch rekonstruiert. Ausgehend von einem manuell gewählten Punkt auf dem Aneurysma wird der Punkt mit der höchsten euklidischen Distanz zur *Centerline* gesucht. Die *Centerline C* wird auf die polygonale Oberfläche projiziert und auf der resultierenden *Centerline C'* werden zwei Kontrollpunkte automatisch positioniert (siehe Abb. 2a). Eine Schnitt-Ebene, definiert durch die ersten beiden Punkte und der Normalen, die zum Dom-Punkt ausgerichtet ist, wird die Oberfläche geschnitten. Auf der so gewonnenen *Ostium*-Kontur werden weitere zwei Punkte gegenüberliegend platziert. Abschließend erfolgt eine lokale Optimierung der Punktpositionen. Zwischen den vier Punkten wird eine geschlossene *Spline*-Kurve erzeugt, deren einschließende Fläche abschließend vernetzt wird (siehe Abb. 2b). Für eine detailliertere Beschreibung der *Ostium*-Detektion siehe [15].

2.2. Definition einer Fokusregion

Da sich die hier vorgestellten Visualisierungsansätze auf den Aneurysmabereich beziehen, wird dieser als Fokusregion definiert. Eine separate geometrische Betrachtung dieser Region ist durch die Bestimmung des *Ostiums*, als Trennfläche zum übrigen Gefäß möglich. Basierend darauf kann über die Hauptachsen des Aneurysmasackes eine erweiterte geo-

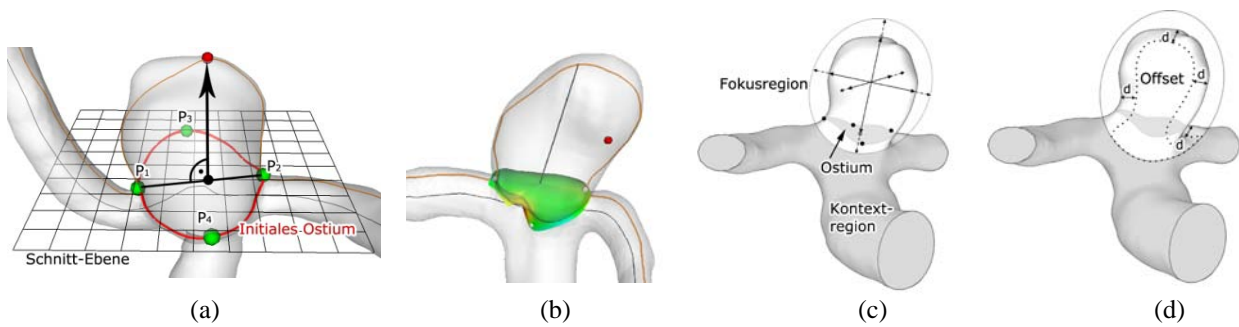


Abb. 2: (a) Definition der Schnittebenen und Anpassung des initialen *Ostiums*, (b) resultierende *Ostium-Fläche*, (c) Definition der Fokus- und Kontextregion, (d) Illustration des *Offset-Wertes* d .

metrische Hülle um das Aneurysma definiert werden, in der die visuelle Anpassung erfolgt. Alle Bereiche außerhalb werden als Kontext angesehen (siehe Abb. 2c). Die Fokusdarstellung der Aneurysmaoberfläche geschieht dabei in der angepassten Oberflächendarstellung wie in [5] beschrieben. Die Kontextdarstellung der Aneurysmaoberfläche erfolgt durch eine Liniendarstellung, wo die Randbereiche mittels Schraffurlinien entlang der Hauptkrümmungsrichtung die Oberflächenform beschreiben. Die effektive Beschreibung von Oberflächenkrümmung durch Schraffurlinien wurde beispielsweise in [16] untersucht und kann durch existierende Schraffierungsverfahren umgesetzt werden [17].

2.3. Reduktion der Flussdarstellung

Die Visualisierung der Strömungsinformationen an jeder räumlichen Position im Aneurysma erhöht die Komplexität der Darstellung und erschwert damit die visuelle Exploration. Da die innen liegenden Strömungen für die Beurteilung des Strömungsverhaltens weniger relevant sind als die äußeren, ist eine reduzierte Darstellung auf diese, wandnahen Strömungen, sinnvoll. Der Bereich der Reduktion wird durch den Anwender mithilfe eines *Offset-Wertes* d zur Wand hin festgelegt (siehe Abb. 2c). Strömungen innerhalb dieses Bereiches werden vollständig dargestellt, während die weiter innerhalb des Aneurysma liegenden Strömungen reduziert dargestellt werden. Die Reduktion erfolgt durch eine visuelle Abschwächung der innenliegenden Strömungsvisualisierung beispielsweise durch Transparenz oder Graustufen-darstellungen. Diese reduzierte Darstellung wird auch für die Flussvisualisierung außerhalb der unter Abschnitt 2.2. definierten Fokusregion angewendet.

2.4. Hinzufügen von Tiefenhinweisen

Unsere Beobachtungen haben ergeben, dass hintere Bereiche von Strömungsvisualisierungen, weniger wahrgenommen werden, als die vorderen. Zudem stören sie den Betrachter bei der Interpretation von räumlichen Lagebeziehungen der gesamten Strömungsvisualisierung. Angelehnt an existierende Verfahren für die Steigerung der Tiefenwahrnehmung von 3D Strömungsinformationen [6] werden weiter hinten liegende Strömungsinformationen abgeschwächer dargestellt als vordere. Erreicht werden kann diese Abschwächung ebenfalls durch Anpassung der visuellen Eigenschaften der Strömungsdarstellung, wie z.B. die Anpassung der Linienbreite bei der Darstellung von *Streamlines* bzw. der Glyphengröße, das Hinzufügen von Umrandungen (*Halos*) oder die Anpassung der Farbsättigung.

3 Ergebnisse

Das Verfahren zur geometrischen Rekonstruktion der *Ostium-Fläche* wurde mithilfe der Entwicklungsumgebung MeVisLab [18] und VTK (*The Visualization Toolkit*, ©Kitware) bereits implementiert und bisher auf sieben Aneurysmadatensätzen mit jeweils unterschiedlicher Morphologie sowie Trägergefäßkonfiguration angewendet. Validiert wurden die gefundenen Ostien durch Befragung radiologischer Experten. Es zeigte sich, dass sechs von sieben Ostien korrekt gefunden wurden. Ein *Ostium* bei einem sehr breitbasigen Aneurysmahals wurde unterbestimmt.

In der Abb. 3 sind verschiedene Entwürfe einer angepassten Oberflächen- und Flussvisualisierung dargestellt. Die Abb. 3a zeigt dazu die Aneurysmagefäßdarstellung mit der innenliegenden Flussdarstellung als farbkodierte *Streamlines*. Zusätzlich ist Fokus- und Kontextregion jeweils markiert. Obwohl nur wenige *Streamlines* verwendet wurden, hat die Darstellung bereits eine gewisse Komplexität. Demgegenüber zeigt die Abb. 3b die Anpassung der Visualisierung der

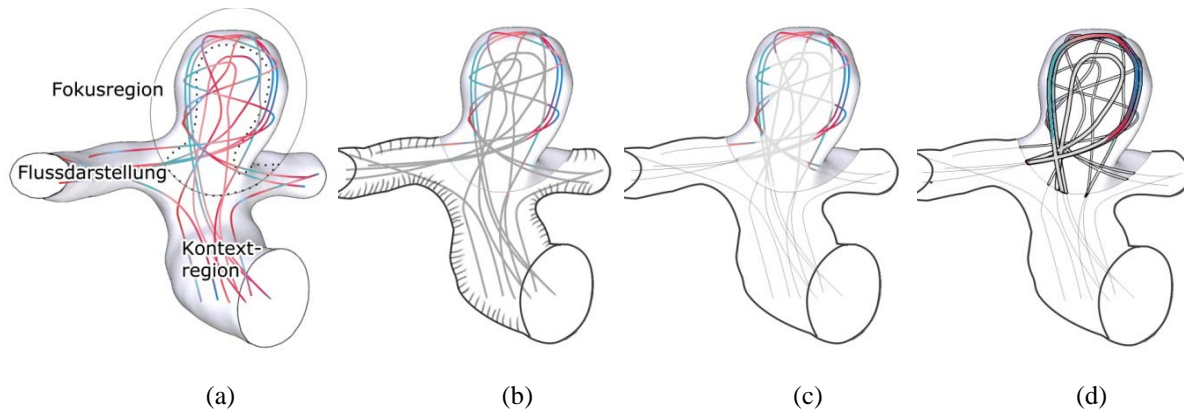


Abb. 3: Beispielillustrationen für die angepasste Visualisierung der Aneurysmaoberfläche und innenliegender Strömung (dargestellt als farbkodierte *Streamlines*): (a) Keine Anpassung, (b) Anpassungen innerhalb der Fokus- und Kontextregion, (c) und (d) Adaption der *Streamline*-Breite und zusätzliche Umrandungen für einen verstärkten Tiefeneindruck.

Aneurysmaoberfläche sowie des Flusses, wie sie im Abschnitt 2.3 beschrieben ist. Erkennbar ist die visuelle Hervorhebung des Aneurysmasackes und der dort enthaltenen wandnahen Strömungen. Eine zusätzliche Verringerung der *Streamline*-Breite in der Kontextregion sowie Senkung der Linientransparenz außerhalb des vom Nutzer definierten Wandbereiches, verstärkt diesen Effekt (siehe Abb. 3c). Zur Verstärkung der räumlichen Tiefenwahrnehmung innerhalb des Aneurysmasackes wurde die Breite der *Streamlines* mit zunehmender Entfernung angepasst, wie in Abb. 3d zu sehen ist. Weiter entfernte *Streamlines* werden dabei bis zu einer bestimmten Mindestbreite schmäler dargestellt. Damit wird sichergestellt, dass der Flussverlauf trotzdem angedeutet bleibt, jedoch die räumliche Lagebeziehung zu den weiter vorn liegenden Strömungslinien hervorgehoben wird. Die zusätzlich hinzugefügten Umrandungen um die *Streamlines* verstärken deren Wahrnehmung der räumlichen Lagebeziehungen. Damit ist es beispielsweise leichter zu erkennen, welche *Streamlines* vor oder hinter anderen liegen.

4 Diskussion

Die hier vorgestellten Entwürfe zeigen erste angepasste Visualisierungen von zerebralen Aneurysmen mit innenliegenden Blutflussinformationen. Durch die Unterteilung in Fokus- und Kontextregion des Aneurysmas sowie der damit individuellen Visualisierung von Oberfläche und Blutströmung werden zwei Ziele verfolgt:

- Die Lenkung der Aufmerksamkeit des Betrachters auf relevante Bereiche des Aneurysmas
- Die erleichterte Interpretation des Flussverlaufes im Aneurysmabereich.

Die bisherige Darstellung und visuelle Anpassung der Blutflussdarstellung durch *Streamlines* kann auch auf andere geometrische Primitive wie Glyphen sowie animierte Darstellungen der Strömung angewendet werden. Für eine klinische Erprobung der Methoden müssen diese zunächst implementiert und geeignet automatisch parametrisiert werden. Hierfür eignen sich insbesondere Voreinstellungen (Templates), abhängig von der konkreten Fragestellung mit der die Strömung im Aneurysma untersucht werden soll. Beispielsweise könnte dem medizinischen Anwender die Geschwindigkeit und das Strömungsverhalten im Wandbereich interessieren. Das Visualisierungssystem würde dafür *Streamlines* als Darstellungsmethode für den Blutfluss auswählen und entsprechend die lokale Geschwindigkeit auf Farbe kodieren. Der Benutzer hätte zusätzlich noch die Möglichkeit die Größe des Randbereiches (vgl. Offset in Abschnitt 2.3) einzustellen.

Weiterhin muss durch eine Evaluierung untersucht werden, ob dem medizinischen Anwender die hier vorgestellte angepasste Visualisierung gegenüber den bisherigen Darstellungsmethoden hilft die Fragestellungen leichter und genauer zu beantworten. In diesem Zusammenhang muss auch untersucht werden, ob die hier gewählten Visualisierungstechniken für die umschließende Gefäßoberfläche auch sinnvoll mit den Techniken für die Flussvisualisierung kombinierbar sind. Dies betrifft beispielsweise die Kombinierbarkeit der im Kontextbereich liegenden schraffierten Aneurysmaoberfläche mit der *Streamline*-Darstellung der Blutflussinformationen im Fokusbereich (siehe Abb. 3b).

Danksagung: Die Autoren danken G. Janiga und S. Seshadhri (ISUT Magdeburg) für die Bereitstellung der Simulationsdaten sowie Fraunhofer MEVIS (Bremen) für die Bereitstellung der Entwicklungsumgebung MeVisLab. Die vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes MOBESTAN (Förderkennzeichen: 5161AD/0308M) vom Land Sachsen-Anhalt gefördert.

5 Referenzen

- [1] Juvela, S.; Porras, M.; Poussa, K.: “Natural History of Unruptured Intracranial Aneurysms: Probability of and Risk Factors for Aneurysm Ruptures“, *Journal of Neurosurgery*, Volume 93, 379-387, 2000.
- [2] Andaluz, N.; Zuccarello, M.: “Recent Trends in the Treatment of Cerebral Aneurysms: Analysis of a Nationwide Inpatient Database“, *Journal of Neurosurgery*, 1163-1169, 2008.
- [3] Cebal, J. R.; Castro, M. A.; Burgess, J. E.; Pergolizzi, R. S.; Sheridan, M. J. et al.: “Characterization of Cerebral Aneurysms for Assessing Risk of Rupture by Using Patient-Specific Computational Hemodynamic Models“, *American Journal of Neuroradiology*, Volume 26 (10), 2550-2559, 2005.
- [4] Tateshima, S.; Chien, A.; Sayre, J.; Cebal, J. R.; Vinuela, F.: “The Effect of Aneurysm Geometry on the Intra-Aneurysmal Flow Condition“, *Neuroradiology*, Springer, 2010.
- [5] Gasteiger, R.; Neugebauer, M.; Kubisch, C.; Preim, B.: “Adaptive Surface Visualization of Cerebral Aneurysms with Embedded Bloodflow Information“, *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*, 25-32, 2010.
- [6] Mattausch, O.; Theußl, T.; Hauser, H.; Gröller, E.: “Strategies for Interactive Exploration of 3D Flow Using Evenly-Spaced Illuminated Streamlines“, *Computer Graphics*, 213-222, 2003
- [7] McLoughlin, T.; Laramée, R. S.; Peikert, R.; Post, F. H.; Chen, M.: “Over Two Decades of Integration-Based, Geometric Flow Visualization“, *Computer Graphics Forum*, erscheint, 2010
- [8] Neugebauer, M.; Gasteiger, R.; Beuing, O.; Diehl, V.; Skalej, M. et al.: “Map Displays for the Analysis of Scalar Data on Cerebral Aneurysm Surfaces“, *Computer Graphics Forum*, 895-902, 2009
- [9] Laramée, R.S. und Hauser, H.: “Interactive 3D Flow Visualization Based on Textures and Geometric Primitives Geometric Flow Visualization“, *NAFEMS World Congress*, 75-86, 2005
- [10] Seshadhri, S.; Janiga, G.; Preim, B.; Rose, G.; Skalej, M.; Thévenin, D.: “Numerical simulation and Experimental Validation in an Exact Aortic Arch Aneurysm Model“, *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, Volume 22 (14), 1975-1979, 2009
- [11] Schöberl, J.: “NETGEN: An Advancing Front 2D/3D-Mesh Generator Based on Abstract Rules“, *Computing and Visualization in Science*, Volume 1, 41-52, 1997
- [12] Antiga, L.; Piccinelli, M.; Botti, L.; Ene-Lordache, B.; Remuzzi, A. et al.: “An Image-Based Modeling Framework for Patient-Specific Computational Hemodynamics“, *Medical and Biological Engineering and Computing*, Volume 46 (11), 1097-1112, Springer, 2008
- [13] Markl, M.; Harloff, A.; Bley, T. A.; Zaitsev, M.; Jung, B. et al.: “Time-Resolved 3D MR Velocity Mapping at 3T: Improved Navigator-Gated Assessment of Vascular Anatomy and Blood Flow“, *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Volume 25 (4), 824-831, 2007
- [14] Bousset, L.; Rayz, V.; Martin, A.; Acevedo-Bolton, G.; Lawton, M. T. et al.: “Phase-Contrast Magnetic Resonance Imaging Measurements in Intracranial Aneurysms In Vivo of Flow Patterns, Velocity Field, and Wall Shear Stress: Comparison with Computational Fluid Dynamics“, *Magnetic Resonance in Medicine*, Volume 61 (2), 409-417, 2009
- [15] Neugebauer, M.; Diehl, V.; Skalej, M.; Preim, B.: “Ostium Reconstruction for Saccular Aneurysms“, *erscheint, Vision, Modeling, and Visualization*, 2010
- [16] Kim, S.; Hagh-Shenas, H.; Interrante, V.: “Conveying Shape with Texture: Experimental Investigations of Texture's Effects on Shape Categorization Judgments“, *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Volume 10 (4), 471-483, 2004
- [17] Ritter, F.; Hansen, C.; Dicken, V.; Konrad, O.; Preim, B. et al.: “Real-Time Illustration of Vascular Structures“, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volume 12 (5), 877-884, 2006
- [18] Link, F.; Kuhagen, S.; Boskamp, T.; Rexilius, J.; Dachwitz, S.; Peitgen, H.O.: “A Flexible Research and Development Platform for Medical Image Processing and Visualization“, *Proceeding Radiology Society of North America (RSNA)*, Chicago, 2004.