

Validierung von Strömungssimulationen in kardiovaskulären Anwendungen

Christoph Petz¹, Detlev Stalling¹, Leonid Goubergrits², Klaus Affeld²
und Andreas Spuler³

¹Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustraße 7, 14195 Berlin

²Charité Berlin, Labor für Biofluidmechanik, Spandauer Damm 130, 14050 Berlin

³Helios Klinikum Berlin, Hoberechtsfelder Chaussee 96, 13125 Berlin

Zusammenfassung. Die Strömungseigenschaften in Blutgefäßen sind nur sehr schwer zugänglich, bzw. einige Eigenschaften sind auch gar nicht exakt messbar. Theoretische Strömungsmodelle und Berechnungen sind daher ein wertvolles Hilfsmittel für deren Erforschung. Die Strömungsberechnung ist sehr komplex und die Korrektheit der Berechnung ist von vielen Parametern abhängig. In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren vor, mit dem wir die berechnete Blutströmung in einem Gefäßsystem durch einen experimentellen Versuchsaufbau verifizieren. Der Vergleich von Experiment und Simulation erfolgt auf der Basis von Bildsequenzen, die mit Methoden der wissenschaftlichen Visualisierung aus der Simulation erzeugt werden.

1 Einleitung

Für viele Fragestellungen in der kardiovaskulären Medizin werden detaillierte Kenntnisse über das Strömungsverhalten des Blutes in den Gefäßen bzw. Ventrikeln benötigt. Die Anwendungen sind sehr vielfältig: Verschiedene Phänomene wie z.B. das Entstehen von Tromben oder Erkrankungen wie Arteriosklerose können damit besser verstanden werden. Die Erforschung des Strömungsverhaltens in der Nähe von künstlichen Herzklappen führt zur Entwicklung besserer Prothesen, oder durch die Analyse der Blutströmungen in zerebralen Aneurysmen kann die Auswahl einer geeigneten Therapiemethode erfolgen[1,2,3].

Das dreidimensionale Strömungsverhalten in diesen Geometrien ist hoch komplex (nicht-Newtonsche Fließeigenschaften von Blut, das Auftreten von Turbulenzen, etc.). Eine genaue Kenntnis der Strömungsparameter, insbesondere z.B. der Wandschubspannungen, sind aber für die Forschung von großem Interesse[4].

Die Analyse dieser Strömungsphänomene mit experimentellen Methoden, wie z.B. mit dem Laser-Doppler-Verfahren oder Partikel-Image-Velozimetrie, sind sehr aufwendig, und einige Parameter sind experimentell nicht hinreichend genau messbar. Aus diesem Grund bieten sich numerische Berechnungsmethoden der *Computational Fluid Dynamics* (CFD) an. Dabei werden auf einem Geometriemodell die 3D Navier-Stokes Gleichungen berechnet.

Für die Verwendbarkeit der Berechnungen ist es essentiell, dass die relevanten Eigenschaften der Simulation mit der Realität in den Gefäßen übereinstimmen. Für die Validierung der Berechnung haben wir ein Verfahren entwickelt, bei dem wir mit Hilfe eines Farbauswaschversuchs die Ergebnisse zwischen der Berechnung mit einem realem Modell vergleichen können. Dazu erstellen wir ein durchsichtiges Silikon-Modell des betreffenden Gefäßsystems und führen mit diesem Modell den Farbauswaschversuch durch. Parallel dazu simulieren wir diesen Farbauswaschversuch mit der berechneten Strömung des Computermodells. Die berechneten Farbkonzentrationen werden visualisiert, und durch einen Vergleich mit den Farbkonzentrationen während des Versuchs verifizieren wir die Gültigkeit der Simulation.

In Abschnitt 2 beschreiben wir die Versuchsdurchführung, angefangen von CT-Daten, bis zu der Erstellung von vergleichbaren Bildsequenzen. In Abschnitt 3 beschreiben wir Details des verwendeten Visualisierungsalgorithmus und dessen Implementierung. In Abschnitt 4 stellen wir die Ergebnisse zusammen.

2 Farbauswaschversuch

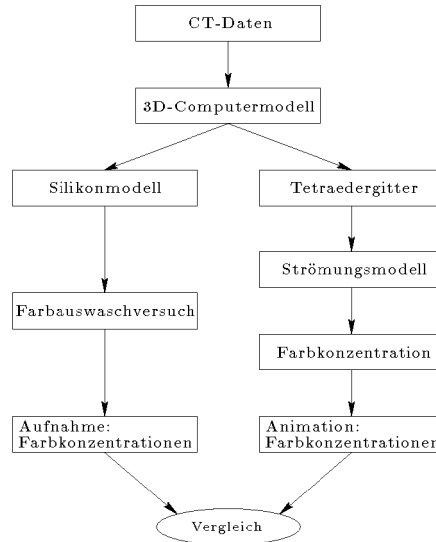
Ein Überblick über das Vergleichsverfahren mit Zwischenergebnissen ist in Abb. 1 zu sehen. Der Ausgangspunkt ist eine CT-Aufnahme des zu untersuchenden Gefäßsystems. Das Ziel des Verfahrens ist es, das berechnete Strömungsmodell zu verifizieren. Bei der CT-Aufnahme handelt es sich um eine Menge von zweidimensionalen Schnittbildern durch das Gefäßsystem. In dem ersten Verarbeitungsschritt wird daraus ein dreidimensionales Computermodell erstellt. Dazu werden die Gefäße in den Bildern segmentiert, und mit der Software Amira[7] wird aus den segmentierten Bildern ein 3D-Computermodell erstellt. Dieses Modell ist dann der Ausgangspunkt für die Strömungsberechnung und die Durchführung des Farbauswaschversuchs.

Für die Berechnung des Strömungsverhaltens in dem Gefäßsystem mit der *Finite Elemente Methode* (FEM) wird ein Tetraedergitter der Geometrie erzeugt. Die instationäre Berechnung der 3D Navier-Stokes Gleichungen auf den Gitterpunkten wird mit dem Control-Volume-FEM Strömungslöser Fluent durchgeführt. Damit wird an jedem Gitterpunkt ein Vektor für Richtung und Betrag der Strömung berechnet.

Aufbauend auf dieser Strömungsberechnung führen wir die numerische Simulation des Farbauswaschversuchs durch. Darin wird durch Simulation des Spezientransports der Bewegungsverlauf einer Flüssigkeit im Laufe der Zeit durch das Gefäßsystem berechnet. An jedem Gitterpunkt wird dabei zu jedem Zeitschritt die Konzentration der anfänglichen Flüssigkeit berechnet.

Das nächste Ziel ist es, die Berechnung mit dem Experiment zu vergleichen. Dazu visualisieren wir den berechneten Verlauf der Farbkonzentration (Abschnitt 3). Für eine bessere Vergleichbarkeit wählen wir die Visualisierungsparameter entsprechend denen des Experiments. Das bedeutet Farbe der Flüssigkeit, Beleuchtung und Ausrichtung der Geometrie werden entsprechend angepasst.

Abb. 1. Schematische Darstellung der Zwischenergebnisse für den Vergleich zwischen dem Experiment und der Simulation.



Die experimentelle Durchführung beginnt mit dem gleichen 3D-Computermodell des Gefäßsystems. Zuerst wird daraus mit dem *Rapid Prototyping* Verfahren ein reales Modell des Gefäßsystems erstellt. Mit Hilfe dieses Modells erstellen wir in mehreren Verarbeitungsschritten ein inverses Hohlraum-Modell aus durchsichtigem Silikon. Das Silikonmodell wird mit einer farbigen Flüssigkeit gefüllt und mit klarem Wasser ausgewaschen. Während des Versuchs wird der Aufbau von hinten durchleuchtet, der Farbverlauf wird von vorne mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Wir verwenden den molekularen Farbstoff Indigotine (E132), die aufgenommene Farbintensität sinkt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz.

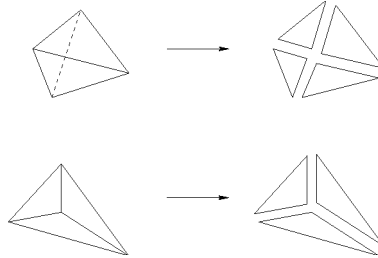
3 Visualisierung

Durch die Berechnung des Farbauswaschversuchs ist in jedem Zeitschritt an den Gitterpunkten des Tetraedergitters die momentane Farbdichte in der Flüssigkeit gegeben. Für den optischen Vergleich mit dem aufgezeichneten Experiment müssen diese Dichtewerte in vergleichbare Bildsequenzen umgewandelt werden.

Für die Farbberechnung wird ein physikalisches Modell der Interaktion zwischen Licht und Farbe zugrunde gelegt [5]. Analog zum Experiment wird das Modell in der Visualisierung von hinten durchleuchtet, die Farbe schwächt das Licht ab. Die Lichtabschwächung kann durch

$$I(t) = I_0 \exp \left(- \int_0^l \tau(s) ds \right) \quad (1)$$

Abb. 2. Bei der Methode der projizierten Tetraeder werden die Tetraeder je nach Orientierung im Raum in 3 oder 4 Dreiecke zerlegt und gezeichnet.



berechnet werden. Dabei ist $\tau(s) = \alpha\rho(s)$, $\rho(s)$ die Farbdichte, und α eine Konstante, unterschiedlich für jeden Farbkanal (rot, grün, blau). I_0 ist die Lichtintensität vor dem Tetraeder und l die Weglänge des Strahls im Tetraeder.

Die Bildsynthese wird mittels Ray-Casting berechnet. Für jeden Lichtstrahl, von der Hintergrundbeleuchtung durch die Pixel des Bildes zum Betrachter, wird die Lichtabschwächung entlang eines Strahls durch die Geometrie berechnet. Jeder Strahl schneidet dabei einige der Tetraeder des Modells. Für jeden dieser Schnitte wird die Lichtintensität an der Austrittsstelle des Strahls berechnet.

Um die Leistungsfähigkeit der Grafikhardware auszuschöpfen verwenden wir die Methode der projizierten Tetraeder [6]. Dadurch wird die Bildsynthese erheblich beschleunigt. Die Tetraeder werden nacheinander auf die Hintergrundebene projiziert. In der Projektion zerfällt ein Tetraeder dabei, je nach Orientierung im Raum, in 3 oder 4 Dreiecke (Abb. 2). An den Eckpunkten der Dreiecke werden die Lichtabschwächungen nach (1) für die drei Farbkanäle berechnet. Für jeden Strahl ist die Lichtabschwächung abhängig von der Weglänge des Strahls im Tetraeder l , und wegen linearer Interpolation im inneren des Tetraeders, von der Farbdichte am Eintrittspunkt τ_E und am Austrittspunkt τ_A . Die Größen variieren in der orthografischen Projektion linear entlang der Schenkel der Dreiecke.

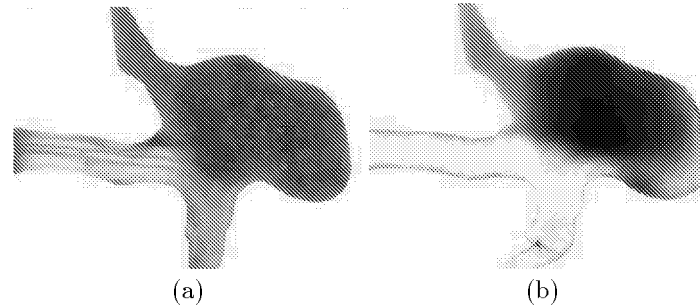
Die Lichtabschwächung nach (1) ist nicht linear in diesen Parametern. Je nach gewünschter Darstellungsgenauigkeit verwenden wir für die Berechnung der Exponentialfunktion deshalb:

$$\exp\left(-\int_0^l \tau(\tau_E, \tau_A, s) ds\right) \approx \exp(-\bar{\tau}_c l) \approx 1 - \bar{\tau}_c l, \quad (2)$$

mit $\bar{\tau}$ der mittleren Farbdichte von Eintritts- und Austrittspunkt und $\bar{\tau}_c$ die mittlere Farbdichte im Tetraeder. Die drei Näherungen sind abhängig von drei (τ_E, τ_A, l), zwei ($\bar{\tau}, l$) und einem (l) Parameter. Die Interpolation kann entsprechend mit 3D-Texturen, 2D-Texturen oder direkt implementiert werden.

Im Bildspeicher wird die Farbintensität berechnet durch Multiplikation der Farbwerte der Dreiecke mit den aktuellen Werten im Bildspeicher. Diese Operation wird durch die Grafikkbibliothek OpenGL [8] direkt unterstützt, gesteuert durch die Funktion `glBlendFunc(GL_ZERO, GL_SRC_COLOR)`.

Abb. 3. Vergleich zwischen Aufnahme aus dem Farbauswaschversuch (a) und Bild aus der Simulation (b).



4 Ergebnisse

In Abb. 3 sind Bilder aus dem Experiment und der Simulation zu sehen. Vergleichbare Bildsequenzen befinden sich auf unserer Webseite [9]. Wesentliche Phänomene, die in dem experimentellen Farbauswaschversuch zu sehen sind, können auch in der Simulation nachvollzogen werden.

Numerische Methoden zur Berechnung des Strömungsverhaltens in einem Blutgefäß führen zu wertvollen Erkenntnissen über “innere” Eigenschaften. Die Simulation des Farbauswaschversuchs, die Visualisierung dieser Simulation und der Vergleich mit dem entsprechenden Experiment ist ein einfacher und effektiver Weg, diese Berechnungen zu validieren.

Literaturverzeichnis

1. D.A. Steinman, J.S. Milner, C.J. Norley, S.P. Lownie and D.W. Holdsworth, “Image-based computational simulation of flow dynamics in a giant intracranial aneurysm”, *Am J Neuroradiol.*, 24(4): 559–566, 2003.
2. L. Goubergrits, A. Spuler, K. Affeld und U. Kertzsch, “Beeinflussung der Strömung in zerebralen Aneurysmen durch Colling und Clipping”, *Biomedizinische Technik*, Band 48, Ergänzungsband 1, 2003.
3. U. Kertzsch, L. Goubergrits, A. Spuler und K. Affeld, “Strömung in zerebralen Aneurysmen”, *Biomedizinische Technik*, Band 47, Ergänzungsband 1, 2002.
4. Y.P. Gobin, J.L. Counord, P. Flaud and J. Duffaux, “In vitro study of haemodynamics in a giant saccular aneurysm model: influence of flow dynamics in the parent vessel and effects of coil embolisation”, *Neuroradiol.*, 36: 530–536, 1994.
5. N. Max, “Optical Models for Direct Volume Rendering”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(2): 99–108, 1995.
6. P. Shirley and A. Tuchmann, “A Polygonal Approximation to Direct Scalar Volume Rendering”, *ACM Computer Graphics*, 24(5): 63–70, 1990.
7. Amira. “<http://amira.zib.de>”.
8. M. Segal and K. Akeley, “The OpenGL Graphics System: A Specification (Version 1.5)”, Silicon Graphics Inc., 2003.
9. Projektseite. “<http://www.zib.de/visual/projects/colorwash/>”.