

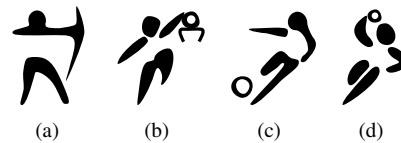
Illustrative Visualisierung von medizinischen Datensätzen¹

Kai Lawonn²

Abstract: Das Ziel der illustrativen Visualisierung ist die vereinfachte Darstellung einer komplexen Szene oder eines komplexen Objektes. Dabei wird versucht die Oberflächenstruktur zu vereinfachen, indem unwichtige Informationen ausgelassen werden. Diese Abstraktion wird oft bevorzugt im Vergleich zu physikalisch korrekten voll ausgeleuchteten Szenen. In der vorgestellten Dissertation wird der aktuellen Stand der Merkmalslinien analysiert. Anschließend wurde eine Evaluierung durchgeführt um die Qualität der Merkmalslinien auf anatomischen Oberflächen festzustellen. Diese Evaluierung leitete zwei Erkenntnisse für die medizinische Anwendung ab. Für jeden Teil wird eine Lösung für die medizinische Visualisierung präsentiert. Eine neue Strichzeichnung für die Illustration von Oberflächen wird vorgestellt. Diese Technik wird dann aufgrund verschiedener Anforderungen für Moleküloberflächen erweitert. Im Bereich der Gefäßvisualisierung mit eingeschlossenem Blutfluss wird eine adaptive Visualisierungstechnik gezeigt. Dieser Algorithmus wird dann für animierte Blutflussdaten erweitert. Schließlich zeigt die vorliegende Dissertation verschiedene Visualisierungskonzepte, die in verschiedenen Anwendungsbereichen benutzt werden können um Oberflächeninformationen zu vermitteln.

1 Einleitung

Die Anwendung der illustrativen Visualisierung hat in den letzten Jahren stets an Bedeutung zugenommen. Eines der Hauptziele der illustrativen Visualisierung ist es, eine ausdrucksstarke, expressive und vereinfachte Darstellung eines Problems, einer Szene oder einer Situation darzustellen. Im Rahmen von Sportveranstaltungen werden die verschiedenen Sportarten beispielsweise als Piktogramme dargestellt, siehe Abbildung 1. Weitere Beispiele können in anatomischen Atlanten gefunden werden. Die meisten anatomischen Strukturen wurden mit Blei- und Filsstiften gezeichnet. Eines des berühmtesten Anatomielehrbuch ist Gray's Anatomy. Andere Anatomieatlanten orientieren sich daran und versuchen gezielt die anatomischen Strukturen vereinfacht und



illustrativ darzustellen. Während in Abbildung 2(a) die organische Struktur im Original abgebildet ist, wurde in Abbildung

Abb. 1: Visuelle Abstraktion der vier olympischen Disziplinen: Bogenschießen, Basketball, Fußball und Handball

2(b) die gleiche Szene illustrative gezeichnet. Hier sieht man, dass die vereinfachte Darstellung der Originalszene einen hohen Einfluss auf das Verständnis hat. Der Medizinstudent erkennt nun viel einfacher die wichtigsten Strukturen und auch medizinische Experten können anhand solcher Darstellungen medizinische Fälle besser diskutieren. Das

¹ Englischer Titel der Dissertation: "Illustrative Visualization of Medical Data Sets"

² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland, lawonn@isg.cs.uni-magdeburg.de

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es neue Illustrationstechniken zu entwickeln, die von konventionellen Techniken inspiriert sind, sich zugleich aber gut für interaktive 3D-Visualisierungen eignen. Dies sollte vor allem auf individuelle patientenspezifische Daten vollzogen werden, die zum Beispiel aus einer Computertomographieuntersuchung stammen. Es sollen illustrative Techniken entwickelt werden, die ohne aufwendige Parameter-einstellungen zufriedenstellende Resultate erzielen.

Fokus-Kontext-Visualisierung. Die illustrative Visualisierung ist allerdings nicht auf dieses Anwendungsgebiet beschränkt. Ebenso essentiell ist die illustrative Visualisierung der Fokus-und-Kontext Darstellung. In einer komplexen Szene mit anatomischen Strukturen, beispielsweise Gefäßen, und einer spezifischen Struktur, wie einem Tumor, steht die zentrale Struktur mit den umschließenden Objekten in Relation zueinander. Daher ist es wichtig, sowohl den Tumor als auch die Gefäße darzustellen. Die Gefäße auszublenden wäre für den medizinischen Experten oder Arzt keine Option. Andererseits wäre die Darstellung aller Strukturen zu komplex und die wichtigen Strukturen könnten nur noch erschwert wahrgenommen werden. Die Fokus-und-Kontext Visualisierung ist charakterisiert durch die detaillierte und hervorgehobene Darstellung von einigen zentralen Strukturen. Umliegende Kontextobjekte werden weniger markant repräsentiert, um visuelle Ablenkung von vorrangigen Fokusobjekten zu vermeiden. Medizinische Beispiele wären Gefäße mit entsprechendem Blutfluss, Leber mit inneren Strukturen wie der Portalvene und Tumor oder Proteine mit Oberflächendarstellung und Cartoon-Darstellung.

Aber nicht nur in der Medizin findet die Fokus-und-Kontext Visualisierung zusehends Beachtung. Beispielsweise werden beim Fahrzeugbau die Karosserien mit innenliegenden Geräten dargestellt. Der Benutzer oder auch der Ingenieur braucht die Möglichkeit, die Relation von Geräte und umliegender Karosserie in der gleichen Szene darzustellen.

Linienzeichnungen. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Illustrationstechniken. Die Dissertation fokussiert sich auf eine ganz spezifische Kategorie: Linienzeichnungen. Linienzeichnungen können in zwei Gruppen eingeteilt werden: *feature lines* oder auch Merkmalslinien und *hatching* bzw. Schraffierungen. Diese Dissertation präsentiert die Anwendung der Linienzeichnungen auf medizinische Daten. Hierfür werden bestehende Merkmalslinien analysiert. Anforderungen und Empfehlungen werden abgeleitet sowie die Vor- und Nachteile werden diskutiert. Anschließend werden Schraffierungstechniken benutzt um die Nachteile der Merkmalslinien zu beheben. Allerdings entstehen hierbei neue Probleme und Herausforderungen.

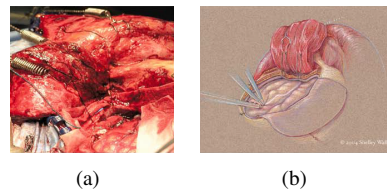


Abb. 2: Visuelle Abstraktion einer anatomischen Struktur. Bilder von "Visually-Oriented Knowledge Media Design in Medicine" Nick Woolridge and Jodie Jenkinson.

Die vorliegende Arbeit leitet den Leser zunächst durch die verschiedenen etablierten Merkmalslinien. Es werden Anforderungen aufgelistet und gezeigt, dass die bestehenden Merkmalslinien gewisse Aufgaben nicht erfüllen können. In einer Evaluierung werden zudem zwei Nachteile aufgezeigt, aus denen dann entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese Nachteile werden erörtert und auf verschiedene Weise gelöst. Dabei wird zunächst eine neue Linientechnik vorgestellt, die die Vorteile von Merkmalslinien und Schraffurlinien kombiniert, ohne überladene Darstellungen zu generieren. Die Vorteile wurden dann in verschiedenen Evaluierungen bestätigt. Anschließend wird diese Technik noch erweitert und präsentiert. Die zweite Richtung beschreibt eine neue adaptive Beleuchtung. Diese Technik macht sich die Vorteile der bereits etablierten Merkmalslinien zu Nutze, die resultierenden Vorzüge konnten ebenfalls in einer Studie bestätigt werden. Diese Technik wird ebenfalls ausführlich diskutiert und erweitert.

In den folgenden Abschnitten werden die wissenschaftlichen Hauptbeiträge der Dissertation [Law14] kurz dargestellt und mit anschaulichen Beispielen illustriert. Für eine Übersichtsdarstellung der Dissertation siehe Abbildung 3.

2 Vorverarbeitungsschritte

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte erläutert, um aus klinischen Bilddaten ein Oberflächenmodell zu generieren. Dies wird anhand von vaskulären Strukturen mit internen Blutfluss erläutert. Die Datenakquirierung besteht aus drei Schritten: **Oberflächenglättung**, **Extraktion** und **Identifikation**.

2.1 Oberflächenglättung

Im ersten Schritt wurden die medizinischen Bilddaten mittels Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) akquiriert. Im zweiten Schritt wird ein auf diese Weise akquiriertes Gefäß segmentiert und rekonstruiert. Durch den hohen Kontrast von Gefäß und umliegendem Gewebe reicht eine einfache Schwellenwertanalyse mit einer *connected-component analysis* aus, um das Gefäß von dem Gewebe abzugrenzen. Die resultierende Gefäßmaskierung wird benutzt, um mit *marching cubes* eine initiale Oberflächenstruktur zu erhalten. Diese Oberfläche beinhaltet diverse Artefakte wie beispielsweise Treppenstufenartefakte. Diese müssen in einem Nachbearbeitungsschritt reduziert werden, da andernfalls gerade diese Artefakte durch Merkmalslinien betont werden. Für den medizinischen Experten sollte nun ein Programm entwickelt werden, um ohne algorithmisches Hintergrundwissen zufriedenstellende Resultate erzielen zu können. Dies war die Motivation für [MKL⁺12, MLK⁺13]. Hier wurden Programme entwickelt, mit denen der medizinische Experte intuitiv und interaktiv in Echtzeit verrauschte Oberflächenmodelle glätten kann. Während des Glättens werden Flächeneigenschaften wie Krümmung oder Volumen reduziert. Daher wurden verschiedene Graphen gewählt, um den Einfluss des Glättens auf diese Flächeneigenschaften nachverfolgen zu können. Zusätzlich empfiehlt das Programm diverse Glättungsparameter, um ein möglichst optimales Glättungsergebnis zu erzielen. Dabei wird ein Parameter verwendet, der angibt wie

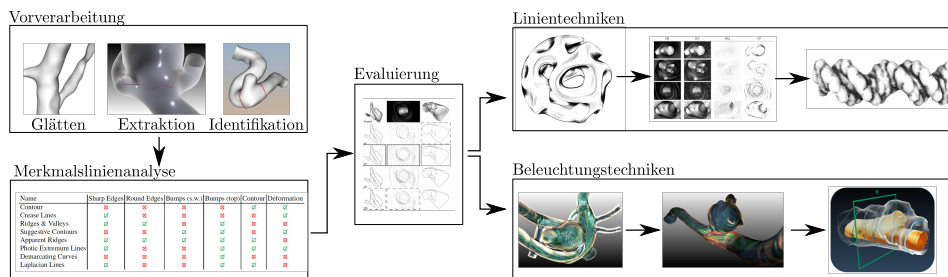


Abb. 3: Die Dissertation im Überblick.

sehr das geglättete Modell vom Original abweichen darf. Wenn der Benutzer an einem geglätteten Modell interessiert ist, welches möglichst das Volumen erhalten soll, schlägt das System Parameter vor, um ein vernünftiges Ergebnis zu erzielen.

2.2 Extraktion von Regionen

Oft ist es wichtig, anatomische Strukturen abzutrennen. Bei der Anwendung auf Gefäßstrukturen können unrelevante Gefäßäste abgeschnitten werden. Im Anschluss kann die rechenaufwändige Blutflusssimulation nur für prägnante Bereiche durchgeführt werden. Hierfür ist eine geeignete Benutzerinteraktion sinnvoll. Der medizinische Experte soll die Möglichkeit haben eine vereinfachte Kurve auf der Oberfläche zu platzieren, die dann geeignet geglättet werden soll. Vor diesem Hintergrund wurde ein Algorithmus entwickelt um den medizinischen Experten bei der Extraktion von spezifischen Regionen zu unterstützen [LGRP14]. Da die Oberfläche später entlang der Kurve geschnitten werden soll, muss sich die resultierende Kurve auf der Oberfläche befinden. So kann sichergestellt werden, dass die Oberfläche auch exakt entlang der Kurve präpariert werden kann. Der Benutzer platziert nun mehrere Punkte, um so die Ausgangskurve zu generieren. Hierbei werden aufeinanderfolgende Punkte initial verbunden. Sobald die initiale Kurve fertiggestellt ist, erhält der Benutzer die Möglichkeit, einen geodätischen Sicherheitsabstand anzugeben. Innerhalb dieser Regionen befindet sich die geglättete Kurve. Somit kann sichergestellt werden, dass die geglättete Kurve nicht zu weit von der Ausgangskurve abweicht. Anschließend wird ein weiterer Parameter, der Glättungsparameter, eingegeben. Dieser Parameter liegt im Intervall $[0, 1]$ und gibt an, wie stark die Ausgangskurve hinsichtlich der geodätische Krümmung geglättet werden soll. Hierbei wird die Ausgangskrümmung mit dem Glättungsparameter multipliziert, um so die gewünschte Krümmung zu erhalten. Wird der Glättungsparameter 1 gesetzt, so stimmen die Ausgangskurve und die resultierende (geglättete) Kurve überein. Wird der Glättungsparameter hingegen 0 gesetzt, so wird die geglättete Kurve gegen eine Geodätische konvergieren. Der Algorithmus ist stabil und erzeugt auch zufriedenstellende und vergleichbare Resultate, selbst wenn das darunter liegende Oberflächenmodell stark verrauscht ist.

Die Anwendungsgebiete reichen von den Ingenieurwissenschaften bis zur Medizin, bei denen Oberflächenschnitte oder Oberschlächensegmentierungen essentiell sind. Beson-

ders im Bereich der Chirurgie spielen Oberflächenschnitte eine besondere Rolle. Hier sind Osteotomien in Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie besonders hervorzuheben.

2.3 Identifikation des Aneurysmas

Für die weitere Auswertung der Gefäßstruktur ist ein automatischer Ansatz hilfreich um wichtige Strukturen, wie das Aneurysma, zu identifizieren. Dies ist zur späteren Blutfluss-simulation wichtig, da dann automatisch Saatpunkte gesetzt werden können.

Weiterhin ist eine automatische Kamerapositionierung hilfreich, um den medizinischen Experten bei der Untersuchung des Aneurysmas zu unterstützen. Diese Anforderungen bildeten die Grundlage für [NLBP13]. Hier wurde ein Algorithmus entwickelt, der das Gefäß analysiert und den Ein- und Ausflussbereich um das Aneurysma detektiert. Dieser Ansatz ist sehr robust gegenüber verrauschten Oberflächen. Zusätzlich wurde eine Methode entwickelt, die das Gefäß analysiert und eine geeignete Kamerapositionierung findet.

3 Linienzeichnungen

Linienzeichnungen stellen Oberflächen mit einzelnen Linien dar. Diese Technik wird verwendet, um bestimmte Regionen oder Objektgrenzen hervorzuheben. Die Techniken können in bildbasierte und objektbasierte Techniken eingeteilt werden. Bildbasierte Methoden benutzen das Bild, um die Linien zu berechnen. Diese Methoden schränken die Freiheit über den Linienstil ein und sind im Allgemeinen nicht bildkohärent. Die Bildkohärenz ist allerdings eine wichtige Voraussetzung für die Exploration. Daher sind bildbasierte Linientechniken nicht im Fokus dieser Dissertation.

Objektbasierte Methoden benutzen die 3D Position der Punkte und deren Konnektivität. Diese Methoden lassen sich in kameraabhängige und kameraunabhängige Methoden einteilen. Eine Kategorie der Linienzeichnungen sind *Merkmalslinien*, die im Rahmen der Dissertation im Hauptfokus liegt. Die Eigenschaften der verschiedenen Merkmalslinien wurden im Rahmen der Dissertation untersucht und bewertet [LP15]. Es wurde ein Leitfaden angegeben, unter welchen Oberflächenvoraussetzungen welche Merkmalslinien geeignet sind. Weiterhin wurde auch der mathematische Hintergrund ausführlich diskutiert, der wiederum essentiell für das Verständnis der verschiedenen Methoden wichtig ist.

Anschließend wurden die verschiedenen Techniken auf medizinischen Daten mit Experten evaluiert [LGP13b]. Hierbei wurden die verschiedenen Techniken vorgeführt. Der Teilnehmer konnte dann die Schwellenwerte für die individuelle Technik eingeben und die resultierende Merkmalslinien bewerten. Die Evaluierung ergab zwei Schlussfolgerungen:

1. Merkmalslinien können im Allgemeinen keinen räumlichen Eindruck vermitteln (eine zusätzliche Beleuchtung wäre notwendig).
2. Die *suggestive contours* ist die expressivste Technik.

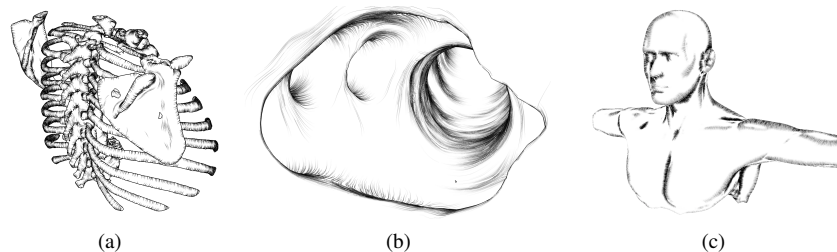


Abb. 4: Verschiedene Linientechniken. In (a) und (b) wurde ConFIS auf ein Rippenmodell bzw. auf ein endoskopisches Modell angewendet. In (c) ist der LIC-basierte Ansatz zu sehen.

Aus diesen Schlussfolgerungen leiten sich zwei Anforderungen ab, die im Rahmen der vorgestellten Dissertationen umgesetzt wurden. Diese Studie wurde später noch mit 149 Teilnehmern erweitert [LBSP14] und statistisch ausführlicher ausgewertet [BLSP15].

4 Neue Linientechniken

Da Merkmalslinien im Allgemeinen keinen räumlichen Eindruck vermitteln können, wurde eine andere Kategorie der Linienzeichnungen untersucht: Schraffierungen (*Hatching*). Im Rahmen der Analyse ergab sich, dass sowohl Merkmalslinien als auch Schraffierungen Vor- beziehungsweise Nachteile aufweisen. Es stellte sich heraus, dass im Gegensatz zu Merkmalslinien die Schraffierungen einen räumlichen Eindruck vermitteln können. Allerdings werden charakteristische Merkmale möglicherweise nicht wahrgenommen oder gar durch die Vielzahl an Linien *überzeichnet*. Die Merkmalslinien können hingegen charakteristische Merkmale darstellen, vermitteln hingegen keinen räumlichen Eindruck. Vor diesem Hintergrund wurde *ConFIS* entwickelt.

4.1 ConFIS

ConFIS ist eine Technik, die die Vorteile beider Linienzeichnungskategorien verbindet [LMP13]. Dadurch ist es möglich, das Objekt mit Linien so darzustellen, dass ein räumlicher Eindruck entsteht und charakteristische Merkmale illustriert werden. Hierbei werden zunächst die Konturen der Oberfläche ermittelt. Anschließend wird ein Bereich um die Kontur herum bestimmt. Für die charakteristischen Oberflächenmerkmale wurde ein Bereich ermittelt, der sich mittels der mittleren Krümmung berechnet. Weiterhin werden die Linien auf der Oberfläche mit der Hauptkrümmungsrichtung bestimmt und auf der Grafikkarte gespeichert. Die entsprechenden Konturregionen aktivieren dann die durchlaufenden Linien. Somit werden charakteristische Oberflächenmerkmale dargestellt und durch den Konturbereich die Form wiedergegeben, siehe Abbildung 4(a). Die Vorteile wurden in einer Studie belegt. Weiterhin wurden diverse Schraffierungstechniken einschließlich ConFIS mit endoskopischen Daten [LSP14] getestet, siehe hierzu Abbildung 4(b). Auch hier ergab sich eine Präferenz zu der ConFIS Technik.

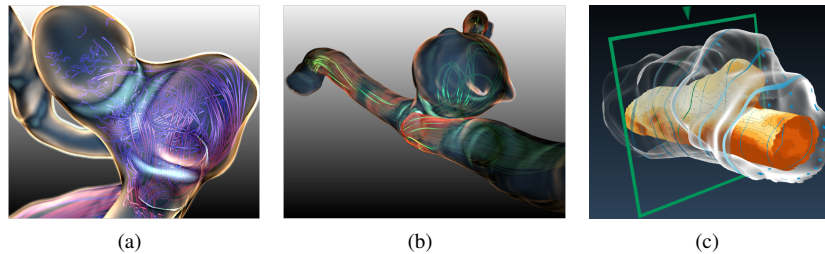


Abb. 5: Verschiedene Beleuchtungstechniken. In (a) und (b) wurde die adaptive Beleuchtung auf ein Aneurysma mit und ohne animierten Blutfluss dargestellt. In (c) ist die Visualisierung der Wanddicke zu sehen.

Allerdings hat auch diese Methode einige Einschränkungen. Zum einen ist ConFIS sehr abhängig von der Tessellierung des Oberflächenmodells. Das bedeutet, dass es bei unterschiedlichen Auflösungsstufen des Objektes sehr unterschiedliche Resultate gibt. Ein anderer Nachteil ist, dass ConFIS nicht auf animierten beziehungsweise deformierbaren Objekten anwendbar ist. Daher wurde ConFIS durch einen LIC-Ansatz (*line integral convolution*) zu ConFIS+ erweitert und verbessert.

4.2 ConFIS+

Die Verbesserung basiert auf einem LIC-Ansatz [LKEP14]. Hier werden die Linien nicht mehr auf der Oberfläche bestimmt, sondern im Bildbereich ermittelt. Das Verfahren ist dennoch ein objektbasierter Ansatz, da die entscheidenden Regionen auf der Oberfläche ermittelt werden. Anstatt der Hauptkrümmungsrichtung wird hier allerdings der Lichtgradient der Oberflächenbeleuchtung bestimmt, der wiederum die Linienrichtung vorgibt. Die charakteristischen Oberflächenmerkmale werden durch ein Skalarfeld bestimmt, das auch bei den *suggestive contours* benutzt wird. Zusätzlich hat das Verfahren einen weiteren Freiheitsgrad für welchen *ambient occlusion* verwendet wird. Das bedeutet, dass die Linienfarbe auch durch die Selbstschattierung beeinflusst wird. Regionen, die durch den Schatten dunkler wären, werden auch durch dunklere Linien dargestellt. So wird der räumliche Eindruck verstärkt, siehe Abbildung 4(c). Zusätzlich wurde gezeigt, dass eine andere Parameterwahl (*shape index* statt *ambient occlusion*) ähnliche Ergebnisse wie [NLB⁺13] erzielt.

Der LIC-Ansatz und das Maß zur Bestimmung der Oberflächenmerkmale sorgen dafür, dass der Ansatz tessellierungsunabhängiger ist. Zusätzlich basieren alle Maße auf der Beleuchtung, sodass der Ansatz auch in Echtzeit und bildkohärent auf animierten Daten funktioniert. Die Vorteile wurden in einer Studie belegt.

5 Adaptive Beleuchtungstechniken

Im Abschnitt 3 wurden zwei Schlussfolgerungen gezogen. Die erste Schlussfolgerung war, dass Merkmalslinien ohne zusätzliche Beleuchtung keinen räumlichen Eindruck vermitteln können (1). Die zweite Schlussfolgerung besagte, dass die *suggestive contours* die expressivste Technik ist (2). Im letzten Teil der Dissertation wurden die beiden Schlussfolgerungen zu einer neuen Technik zusammengefasst. Hier wurde eine Beleuchtungstechnik entwickelt (1), die auf den *suggestive contours* basiert (2).

5.1 Suggestive Contours Beleuchtung

Für die verbesserte Wahrnehmung von konkaven und konvexen Regionen in Abhängigkeit zur Blickrichtung wurde eine Beleuchtungsmethode entwickelt, die auf den *suggestive contours* basiert [LGP13a]. Diese verwenden zur Bestimmung der Linien ein Skalarfeld. Die Nulldurchgänge des Skalarfeldes sind genau die Übergänge von konvexen und konkaven Regionen. Somit wird dieses Feld genutzt, um für die verschiedenen Regionen unterschiedliche Farben zu illustrieren, siehe Abbildung 5(a). Als Anwendungsgebiet wurden Gefäßsysteme mit Blutfluss gewählt. Die adaptive Beleuchtungstechnik wurde so angepasst, dass der interne Blutfluss nicht verdeckt wird. Zusätzlich kann der medizinische Experte essentielle Oberflächenmerkmale wahrnehmen. Eine zusätzliche Fokus-und-Kontext Visualisierung sorgt dafür, dass entfernte Gefäße unscharf dargestellt werden, um so den Fokus der Kamera zu verstärken. Die neue Technik wurde mit medizinischen Experten evaluiert. Hier wurde mit bestehenden Verfahren verglichen und die Experten hatten eine klare Präferenz für die neue Beleuchtungstechnik.

Diese Technik wurde verfeinert und erweitert [LGP14] und mit animiertem Blutfluss angepasst. Der medizinische Experte kann durch intuitive Buttons die Animation abspielen und explorieren. Zusätzlich passt sich die Beleuchtung durch den internen Blutfluss an. Bereiche, die sehr nah an dem animierten Fluss sind, werden hervorgehoben, siehe Abbildung 5(b). So kann der medizinische Experte den wandnahen Fluss leichter wahrnehmen, was bei der Untersuchung von Aneurysmen eine besondere Rolle spielt.

5.2 Visualisierung der Wanddicke

Für die vollständige Exploration des Aneurysmas spielt die Wanddicke eine wichtige Rolle. Bisherige bildbasierte Verfahren unterstützen noch nicht die Akquirierung der Wanddicke. In einem Experiment wurde mit intravaskulärem Ultraschall die Wanddicke eines künstlich geschaffenen Aneurysmas detektiert. Aus den gewonnenen Daten wurde ein Programm entwickelt, welches den medizinischen Forscher in Zukunft die Exploration solcher Daten erlauben soll [GLH⁺14]. Dazu wurde ein Gefährlichkeitsmaß definiert, welches sich aus der Wanddicke und eines Skalars aus dem Blutflusses ableitet, siehe Abbildung 5(c). Weiterhin kann der Experte per *brushing & linking* bestimmte Regionen hervorheben. Automatische Kamerapfade erleichtern das Navigieren. Das Programm wurde

mit verschiedenen Experten evaluiert. Das Resultat der Befragung war, dass alle Experten das Programm nutzen würden, um die Wanddicke eines Aneurysmas zu analysieren.

Im Bereich der Aneurysmenbehandlung wurde ebenfalls ein Programm entwickelt, welches den Einfluss des Blutflusses auf verschiedene Stentkonfigurationen zeigt [VPGL⁺14]. Dieses Programm wurde ebenfalls mit Medizinern evaluiert und positiv aufgenommen.

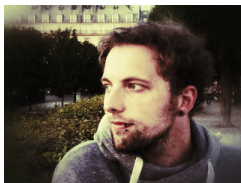
6 Zusammenfassung

Die vorgestellte Dissertation zeigte diverse Bereiche der illustrativen Visualisierung auf und lieferte wesentliche Verbesserungen. Insbesondere wurde erstmals eine Methode vorgestellt, die die Eigenschaften von Merkmalslinien und Schraffierungen kombiniert. Aktuelle Methoden wurden diskutiert und die Nachteile identifiziert. Von diesen Nachteilen ausgehend entstanden neue Methoden für ausgewählte Problemstellungen in der medizinischen Diagnostik und Therapieplanung. Hierzu zählen nicht nur Beiträge zu Datenakquirierung, sondern auch zur Analyse und Evaluierung bestehender Linientechniken. Darauf aufbauend wurden zwei neue Linientechniken entwickelt und entsprechend evaluiert. Zusätzlich entstanden drei neue Beiträge in dem Bereich der adaptiven Beleuchtung. Die entwickelten Methoden sind nicht nur im Bereich der Medizin anwendbar, sondern können auch auf eine Vielzahl anderer Disziplinen angewendet werden.

Literaturverzeichnis

- [BLSP15] Alexandra Baer, **Kai Lawonn**, Patrick Saalfeld und Bernhard Preim. Statistical Analysis of a Qualitative Evaluation on Feature Lines. In *Bildverarbeitung für die Medizin (BVM)*, Seite in print, 2015.
- [GLH⁺14] Sylvia Glaßer, **Kai Lawonn**, Thomas Hoffmann, Martin Skalej und Bernhard Preim. Combined Visualization of Wall Thickness and Wall Shear Stress for the Evaluation of Aneurysms. 20(12):2506 – 2515, 2014.
- [Law14] **Kai Lawonn**. *Illustrative Visualization of Medical Data Sets*. Dissertation, Otto-von-Guericke University Magdeburg, 2014.
- [LBSP14] **Kai Lawonn**, Alexandra Baer, Patrick Saalfeld und Bernhard Preim. Comparative Evaluation of Feature Line Techniques for Shape Depiction. In *Proc. of Vision, Modeling and Visualization*, Seiten 31–38, 2014.
- [LGP13a] **Kai Lawonn**, Rocco Gasteiger und Bernhard Preim. Adaptive Surface Visualization of Vessels with Embedded Blood Flow Based on the Suggestive Contour Measure. In *Proc. of Vision, Modeling and Visualization*, Seiten 113–120, 2013.
- [LGP13b] **Kai Lawonn**, Rocco Gasteiger und Bernhard Preim. Qualitative Evaluation of Feature Lines on Anatomical Surfaces. In *Bildverarbeitung für die Medizin (BVM)*, Seiten 187–192, 2013.
- [LGP14] **Kai Lawonn**, Rocco Gasteiger und Bernhard Preim. Adaptive Surface Visualization of Vessels with Animated Blood Flow. *Computer Graphics Forum*, 33(8):16–27, 2014.

- [LGRP14] **Kai Lawonn**, Rocco Gasteiger, Christian Rössl und Bernhard Preim. Adaptive and Robust Curve Smoothing on Surface Meshes. *Computers & Graphics*, 40(0):22 – 35, 2014.
- [LKEP14] **Kai Lawonn**, Michael Krone, Thomas Ertl und Bernhard Preim. Line Integral Convolution for Real-Time Illustration of Molecular Surface Shape and Salient Regions. *Computer Graphics Forum*, 33(3):181–190, 2014.
- [LMP13] **Kai Lawonn**, Tobias Mönch und Bernhard Preim. Streamlines for Illustrative Real-time Rendering. *Computer Graphics Forum*, 33(3):321–330, 2013.
- [LP15] **Kai Lawonn** und Bernhard Preim. Feature Lines for Illustrating Medical Surface Models: Mathematical Background and Survey. *Visualization in Medicine and Life Sciences*, 2015.
- [LSP14] **Kai Lawonn**, Patrick Saalfeld und Bernhard Preim. Illustrative Visualization of Endoscopic Views. In *Bildverarbeitung für die Medizin (BVM)*, Seiten 276–281, 2014.
- [MKL⁺12] Tobias Mönch, Christoph Kubisch, **Kai Lawonn**, Rüdiger Westermann und Bernhard Preim. Visually Guided Mesh Smoothing for Medical Applications. In *Proc. of VCBM*, Seiten 91–98, September 2012.
- [MLK⁺13] Tobias Mönch, **Kai Lawonn**, Christoph Kubisch, Rüdiger Westermann und Bernhard Preim. Interactive Mesh Smoothing for Medical Applications. *Computer Graphics Forum*, Seiten 1–12, 2013.
- [NLB⁺13] Mathias Neugebauer, **Kai Lawonn**, Oliver Beuing, Philipp Berg, Gabor Janiga und Bernhard Preim. AmniVis - A System for Qualitative Exploration of Near-Wall Hemodynamics in Cerebral Aneurysms. *Computer Graphics Forum*, 32(3):251–260, 2013.
- [NLBP13] Mathias Neugebauer, **Kai Lawonn**, Oliver Beuing und Bernhard Preim. Automatic Generation of Anatomic Characteristics from Cerebral Aneurysm Surface Models. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 8(2):279–289, March 2013.
- [VPGL⁺14] Roy Van Pelt, Rocco Gasteiger, **Kai Lawonn**, Monique Meuschke und Bernhard Preim. Comparative Blood Flow Visualization for Cerebral Aneurysm Treatment Assessment. *Computer Graphics Forum*, 33(3):305–321, 2014.



Kai Lawonn wurde am 4. Oktober 1985 in Berlin geboren. Er studierte Mathematik mit dem Nebenfach Physik an der Freien Universität Berlin und erhielt sein Diplom im Jahre 2011. Von 2006 bis 2011 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Freien Universität Berlin in der Geometrieverarbeitungsgruppe. Von 2012 bis einschließlich 2013 erhielt er ein Promotionsstipendium vom Land Sachsen-Anhalt. Nach zwei Jahren und vier Monaten reichte Kai Lawonn seine Promotion ein und verteidigte sie erfolgreich an der Otto-von-Guericke Universität. Seit 2014 forscht er als PostDoc in der Visualisierungsgruppe in Magdeburg.