

# Strahlenbasierte Algorithmen für die medizinische Visualisierung vielfacher volumetrischer Datensätze

Bernhard Kainz  
Technische Universität Graz  
kainz@icg.tugraz.at

**Abstract:** Das Problem der gleichzeitigen Echtzeitdarstellung mehrerer volumetrischer Datensätze und deren automatischer Anpassung an reale Sachverhalte (zum Beispiel aus der Medizin/Radiologie) war bisher ungelöst. Seit der Entwicklung multimodaler und mehrdimensionaler bildgebender Verfahren in der Medizin und anderen Disziplinen wäre diese aber notwendig. Moderne PC Hardware ermöglicht nun eine effiziente und kostengünstige Umsetzung neuartiger Algorithmen, die dieses Problem für den allgemeinen Fall lösen und bisher nicht mögliche Anwendungen der direkten Volumsdarstellung erlauben. Die Ausnutzung aller Komponenten eines PC Systems, einschließlich der Grafikkarte (GPU) als leistungsfähigen Coprozessor, ist mittlerweile in der angewandten Informatik üblich. Die unterschiedlichen Speicher- und Prozessorarchitekturen machen allerdings Anpassungen bekannter und die Entwicklung vollkommen neuartiger und parallelisierbarer Algorithmen notwendig. Diese Arbeit zeigt, wie GPU-Algorithmen so effizient entwickelt werden können, dass zeitkritische Darstellungsaufgaben sogar mit garantierten Bilderzeugungsraten ermöglicht werden und positionskritische Aufgaben mit höchstmöglicher Genauigkeit durchgeführt werden können.

## 1 Einleitung

Seit etlichen Jahren kommen in der Humantechnologie die unterschiedlichsten volumetrischen bildgebenden Verfahren zum diagnostischen Einsatz, um pathologische Gegebenheiten so genau wie möglich einzugrenzen. Bisher war es allerdings nicht möglich, alle diese Verfahren in derselben virtuellen Szene darzustellen oder effizient genug vorzuverarbeiten, obwohl dies für viele Anwendungen zwingend nötig wäre. Volumetrische Bildsynthesealgorithmen werden üblicherweise direkt auf der Grafikkarte (GPU) eines PC-Systems ausgeführt und zeigen oft schwerwiegende Limitierungen, wenn mehrere Volumina gleichzeitig zu verarbeiten sind. Diese Daten müssen innerhalb einer Szene mit höchstmöglicher Genauigkeit und maximaler Interaktivität dargestellt werden. Da dies aber mit aktuellen Algorithmen nicht möglich ist, wird häufig auf eine rein zweidimensionale und sequentielle Untersuchung der vorhandenen Volumsdaten zurückgegriffen. Diese Art der Datenverknüpfung erfordert eine enorme geistige Anstrengung und einen dementsprechenden Zeitaufwand des behandelnden Arztes. Die zweidimensionale Methode ist zwar auf Detaillevel und für Messaufgaben sehr genau, es zeigt sich aber, dass mangels eines dreidimensionalen Überblicks die Gefahr besteht, kritische Gegebenheiten auf höherer Ebene zu übersehen und vor allem, dass wenn moderne multimodale Bildgebungsverfahren

zum Einsatz kommen, die mehr als nur einen Datensatz erzeugen, eine manuelle zweidimensionale Auswertung oft unmöglich wird.

## 2 Grundlegende Literatur

Seit in den 1980er Jahren die ersten direkten 3D Bildsynthesealgorithmen für medizinische volumetrische Datensätze eingeführt worden sind haben Forscher nützliche Anwendungsgebiete in der klinischen Praxis gefunden und Mediziner haben exzessiv versucht diese in ihren Arbeitsablauf einzubauen. Es ist daher naheliegend, dass zu diesem weit gesteckten Forschungsbereich auch eine Menge an klinischer Literatur existiert. Es haben sich allerdings nur sehr wenige Wissenschaftler, wie in der vorliegenden Dissertation, mit einer retrospektiven Analyse der vorhandenen direkten Volumsdarstellungsmethoden beschäftigt und deren Sinnhaftigkeit evaluiert. McCormick und DeFanti [McC88] haben in den späten 1980er Jahren bereits für die frühen Bildsynthese- und Visualisierungsmethoden zum damaligen Zeitpunkt ungeahnte Anwendungsmöglichkeiten vorhergesagt. Nichts desto trotz sind Fragestellungen wie sie McCormick und DeFanti stellten (vergleiche: *“a smooth integration of useful 3D images for diagnostics”* aus [McC88]) nur teilweise gelöst. Einer der wichtigsten Gründe dafür ist, dass die Auflösung und damit die Größe der generierten Daten in der Medizin mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Leistungsfähigkeit moderner Computer wächst [UH91, NR02].

Diese Dissertation beschäftigt sich in erster Linie mit einem wichtigen Teil der medizinischen Datenvisualisierung: direkte dreidimensionale Bildsynthese und der Lösung spezieller inhärenter Probleme dieser Methoden. Neben früheren Verbesserungen der direkten Volumsdarstellung (zum Beispiel sogenannte *“early-ray termination”* – [Lev90, MIH05] oder *“binary space partitioning”* – [Lev90, LMK03, SHO<sup>+</sup>08] Methoden) wurde in letzter Zeit vermehrt die Parallelisierbarkeit von strahlenbasierten Bildsynthesealgorithmen, die eine Unterklasse der direkten Volumsdarstellung definieren, ausgenutzt. Die Nutzung moderner Grafikkarten, die für den Algorithmientwickler nichts anderes als hoch effiziente programmierbare Parallelprozessoren darstellen, hat bisher am meisten zur Nutzbarkeit der direkten Volumsdarstellung beigetragen [Wei06, AMHH08].

## 3 Hypothesen

Motiviert durch die immer noch übliche Praxis, medizinische Volumsdaten bevorzugt als Serie von Schichtbildern für die Diagnostik nacheinander zu betrachten, untersucht der motivierende Teil der vorliegenden Arbeit mittels einer Umfrage unter mehr als zwei Dutzend Mediznern, ob dreidimensionale Bildsynthese in der Klinik überhaupt erforderlich ist. Dafür wurden vier praxisorientierte Hypothesen evaluiert, die der Autor nach langjähriger Mitarbeit in der klinischen Praxis formulieren konnte. Im Wesentlichen stimmen die befragten Mediziner den Hypothesen zu, in denen erstens festgestellt wird, dass 3D Bildsynthese immer den diagnostischen Entscheidungsprozess beschleunigen muss,

um überhaupt von klinischem Personal für die Verwendung in Betracht gezogen zu werden, zweitens, dass wenn ein neues Visualisierungsverfahren einem bekanntem physikalischen Prinzip ähnelt, es schneller Akzeptanz findet, drittens, dass 3D Bildsynthese unerlässlich wird, wenn die Dimensionalität der zu untersuchenden Daten die normale menschliche Erfahrung übersteigt (z.B. Diffusion Tensor Imaging) und viertens, dass aktuelle 3D-Verfahren weder schnell genug, noch genau genug und nicht flexibel genug sind, um die übliche schichtbasierte Datensatzevaluierung zu ersetzen.

Ausgehend von diesen vier praxisorientierten Hypothesen konnten drei weitere technisch motivierte Hypothesen abgeleitet werden, die im Laufe der restlichen Arbeit näher untersucht werden. Zusammengefasst wird dabei festgestellt, dass die Klasse der volumetrischen strahlenbasierten Algorithmen so erweitert werden kann, dass deren Eingaberaum nicht mehr auf Eins beschränkt ist, dass durch die Ausnutzung der Eigenschaften des menschlichen visuellen Systems die Bilderzeugungsrate erhöht und überdies auch garantiert werden kann und dass diese Klasse von Algorithmen auch für hochgenaue Positionsbestimmungsaufgaben geeignet ist.

## 4 Methoden

Strahlenbasierte Algorithmen basieren auf dem Prinzip, dass virtuelle Strahlen in einer dreidimensionalen Szene verfolgt werden. Sollen mehr als nur ein einziges volumetrisches Objekt in derselben Szene dargestellt werden, muss für jedes dieser Objekte der Strahlenverlauf separat bestimmt werden. Wenn sich die darzustellenden Objekte auch noch überschneiden, wird aus der Bestimmung des Strahlenverlaufs eine aufwendige Sortieraufgabe aller auftretenden Strahlensegmente. Diese Sortierung ist im Allgemeinen zu langsam für Systeme mit Echtzeitanforderungen. Um dieses Problem zu lösen muss der übliche Ansatz, die Szene für ein Bild mehrmals zu rendern überdacht werden. Durch die Ausnutzung moderner GPU-Architekturen ist es möglich die zeitaufwendige Strahlenverlaufsbestimmung in einen einzigen Schritt und in einen GPU-Speicherbereich mit einem Durchsatz von mehreren Terabyte pro Sekunde zu verlagern. Dadurch ist es dem Autor nicht nur gelungen diese Klasse von Algorithmen so effizient zu gestalten, dass die Darstellung mehrerer beliebig angeordneter Volumina in Echtzeit möglich wurde, sondern auch, wie in Abbildung 4 gezeigt, die interaktive Manipulation der verwendeten volumetrischen Raumgeometrien.

Da für manche Applikationen hohe Bilderzeugungsraten alleine nicht ausreichend sein können, wird die Strahlverfolgung im Folgenden dahin gehend optimiert, dass nicht nur hohe Bilderzeugungsraten, sondern auch Bilderzeugungsraten mit einer garantierten Frequenz ermöglicht werden. Solche garantierten Bilderzeugungsraten werden bei interoperativen Applikationen benötigt, bei denen unter keinen Umständen ein Bildruckeln das kontinuierliche Arbeiten des durchführenden Arztes behindern darf. Im Gegensatz zu dem üblichen Verfahren, die Bilderzeugungsrate während der Szeneninteraktion zu Lasten der Qualität zu erhöhen, erhält der in der Arbeit vorgestellte Ansatz die wichtigen Details einer Szene und verhindert so eventuell lebensbedrohliche Fehlentscheidungen. Um Bilderzeugungsraten mit einer garantierten Frequenz zu ermöglichen, sollte idealerweise die



Abbildung 1: Konstruktive Raumgeometrieoperationen auf mehreren volumetrischen Datensätzen.

Wichtigkeit eines jeden einzelnen Bildpunktes vor der Strahlenverlaufsbestimmung bekannt sein. Da dies ein Henne-Ei-Problem beschreibt (das Berechnungsergebnis müsste dabei für jeden einzelnen Bildpunkt vor der eigentlichen Berechnung bekannt sein) hat der Autor zusammen mit seinen Kollegen eine Methode entwickelt um die erforderlichen Parameter für jedes einzelnes Bild vorab abschätzen zu können. Dabei werden zusätzliche Algorithmen eingeführt, die normalerweise dafür eingesetzt werden, ein Objekt nur zu skizzieren. Diese Algorithmen leiten sich von den Techniken ab, die Künstler verwenden um Skizzen zu erstellen, und sind im Allgemeinen sehr gut im Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung untersucht. Außerdem beinhalten diese Methoden keine zeitaufwendigen Beleuchtungsberechnungen und können daher mit minimalem zeitlichen Mehraufwand in strahlenbasierte Algorithmen integriert werden. Ist die Skizze eines Objekts bekannt, kann diese auf die Bildebene projiziert werden und somit die Wichtigkeit jedes einzelnen Bildpunktes vorab abgeschätzt werden. Die bilderzeugenden Strahlen werden schlussendlich ihrer Wichtigkeit nach sortiert abgearbeitet und nicht berechnete Bildpunkte werden mit einer neu entwickelten Interpolationsmethode aufgefüllt. Wenn bei dieser Methode ein einzuhaltendes Zeitfenster für die Berechnung vorgegeben wird, kann davon ausgegangen werden, dass wenn die Bilderzeugung nach Ablauf der vorgegebenen Zeit gestoppt wird, die wichtigsten Bildpunkte bereits vorhanden sind und somit die maximal in dieser Zeit erzielbare Bildqualität erreicht wird. Abbildung 4 zeigt eine Illustration des beschriebenen Überganges von Skizzendarstellung zum rekonstruierten Ergebnisbild.

In einem weiteren Teil dieser Arbeit wird gezeigt, dass strahlenbasierte Algorithmen nicht nur bezüglich der Strahlenverlaufsbestimmung verbessert werden können, sondern dass auch deren Kern für bestimmte Aufgaben spezialisiert und damit optimiert werden kann. Viele medizinische Problemstellungen enthalten ein Positionsbestimmungsproblem. Dabei müssen zuvor bestimmte Stellen im menschlichen Körper so genau wie möglich in der aktuellen Lage des Patienten wiedergefunden werden. Üblicherweise werden dafür

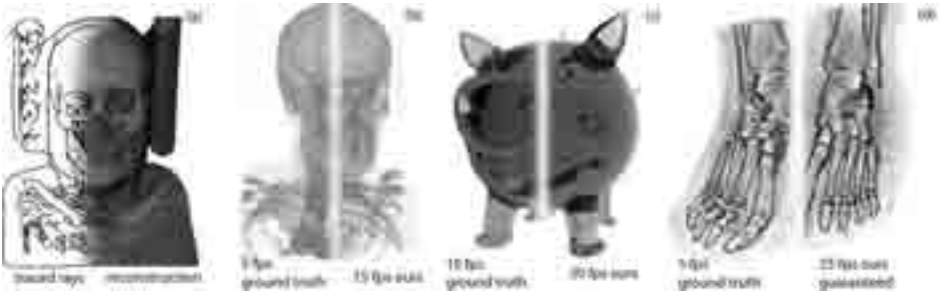


Abbildung 2: Illustration des Überganges von skizzierten Objekt zu rekonstruiertem Ergebnis (a). (b) zeigt wie die vorgestellten Methoden dazu verwendet werden kann die Bilderzeugungsrate zu erhöhen, indem unwichtige Teile interpoliert statt berechnet werden. Die gezeigten Algorithmen können sowohl für volumetrische Datensätze (b) wie auch geometrische photorealistiche Darstellungen (c) benutzt werden. Eine zusätzliche Prioritätssortierung der wichtigen Bildbereiche kann sogar dazu genutzt werden um eine minimal erforderliche Bilderzeugungsrate bei bestmöglichem visuell wahrnehmbarem Ergebnis zu garantieren (d).

sogenannte Registrierungsverfahren eingesetzt, die die Lage und Verzerrung eines Bildes solange optimieren, bis der Unterschied zu einem anderen Bild minimal wird. Die sich daraus ergebenden Parameter können dann für die Berechnung der neuen Position eines Zielgebietes verwendet werden. Genaue Registrierungsverfahren sind allerdings häufig zu langsam für den Einsatz während eines realen Eingriffes und schnellere Verfahren sind oft zu ungenau für einen sicheren Einsatz. Die vorliegende Arbeit zeigt auch für dieses Problem einen möglichen Lösungsansatz am Beispiel eines speziellen 2D/3D Registrierungsproblems, so wie es häufig in der Praxis vorkommt. Registrierungsverfahren optimieren die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildern häufig mittels Gradientenabstiegs. Dafür muss jeder neue Schritt zum vorherigen Ergebnis verglichen werden und die Differenz dazu in einem höherdimensionalen Raum gebildet werden. Betrachtet man dieses Problem mathematisch kann man feststellen, dass in der Gesamtberechnung des Gradienten die erste Ableitung eines spezialisierten strahlenbasierten Verfahrens ein integraler Bestandteil ist. Diese erste Ableitung kann auch mittels sogenannter automatischer Codeableitungsverfahren vor dem eigentlichen Einsatz bestimmt werden. Somit kann der Code eines GPU-basierten Bilderzeugungsalgorithmus direkt als spezialisierte Ableitung ausgeführt werden. Das Ergebnis der vorgeschlagenen Methode ist dann kein Bild mehr, sondern direkt der für die Parameteroptimierung benötigte Gradient der Zielfunktion. Mit diesem Verfahren erreichen wir eine sehr hohe Genauigkeit bei vernachlässigbarem Zeitaufwand und zeigen dessen Anwendungsmöglichkeit an einem konkreten Beispiel aus der Urologie. Mit diesem Verfahren sollte es in Zukunft möglich sein Organresektionen, wie sie zum Beispiel bei Erkrankungen der Prostata üblich sind, in bestimmten Fällen zu vermeiden und somit die Lebensqualität der Patienten zu erhöhen. Abbildung 4 zeigt den schematischen Ablauf eines solchen Verfahrens.

In den meisten Fällen ist allerdings das Wiederauffinden einer bestimmten Position im Körper nicht das alleinige Kriterium für einen erfolgreichen Eingriff. Bei minimal invasiven oder zerebralen Prozeduren ist es auch erforderlich, dass der behandelnde Arzt den

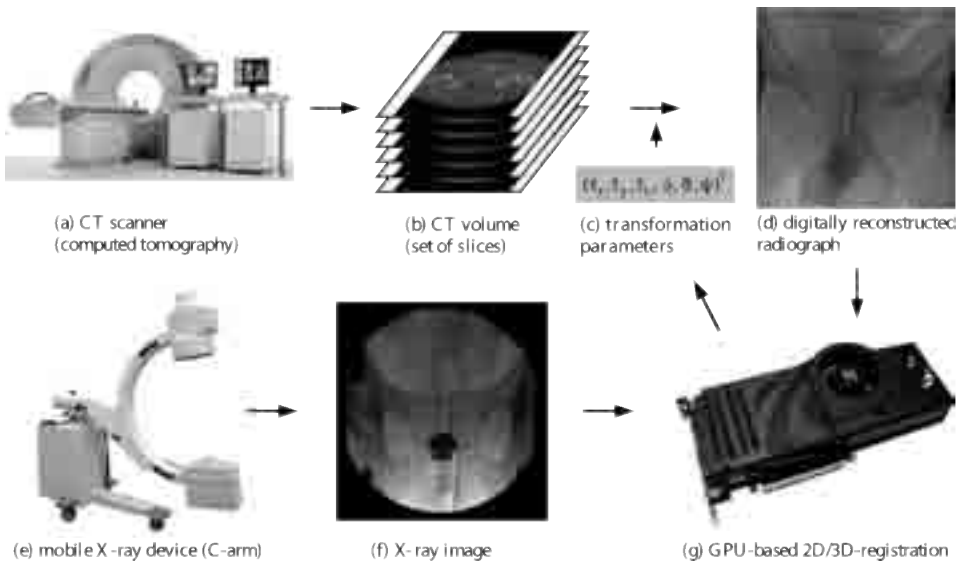


Abbildung 3: Schematischer Ablauf einer Registrierung mit spezialisiertem Bilderzeugungsalgorithmus am Beispiel eines Prostataeingriffs. Vor dem Eingriff wird eine Computertomographie des Patienten erstellt (a) woraus sich ein volumetrischer Datensatz ergibt (b). Mit einem speziellen Algorithmus können daraus die Transformationsparameter (c) für eine künstliche Röntgenbildprojektion (d) berechnet werden. Diese Transformationsparameter können anschließend auf der GPU (g) mit einem realen Röntgenbild (f) verglichen und hinsichtlich ihrer Position optimiert werden. Da während eines urologischem Eingriffes in den meisten Fällen ein C-Bogen (e) standardmäßig für die Erzeugung von Röntgenbildern zum Einsatz kommt, erfordert diese Methode keine neuen medizinischen Geräte um eine vorab bestimmte Position im Körper des Patienten wiederzufinden. Im Laufe dieser Arbeit wurde auch ein Zielobjekt entwickelt, dass die initiale Kalibrierung des C-Bogens erleichtert und beschleunigt.

sichersten Weg zum designierten Einsatzgebiet bestimmt. Im schlimmsten Fall kommt es bei falscher Planung dieser Eingriffe zu unbeabsichtigten Verletzungen von empfindlichen Strukturen, wie zum Beispiel Arterien oder Nervenfasern, und damit leider auch manchmal zu schweren Komplikationen oder zum Tod des Patienten. Um die Eingriffsplanung zu erleichtern hat der Autor dieser Arbeit mit seinen Kollegen eine volumetrische Berechnungsmethode entwickelt, um alle möglichen Zugangswege zu einem bestimmten Zielgebiet und deren Sicherheit, inklusive dem möglichen Handlungsspielraum, zu bestimmen. Dabei kommen bildgebende Verfahren zum Einsatz, wie sie auch bei konventioneller Planung üblicherweise verwendet werden. Der Unterschied ist allerdings, dass mit der vorgestellten Methode nicht mehr jeder Datensatz einzeln evaluiert werden muss, sondern, dass das planungsrelevante Ergebnis aller nötigen Modalitäten in einer gemeinsamen Visualisierung dargestellt werden kann. Damit sinkt die kognitive Belastung des ausführenden Arztes erheblich und die zuvor oftmals nur geschätzten Handlungsspielräume können genau bestimmt werden. Im Unterschied zu bisher üblichen Verfahren, die nur einen Punkt als Ziel verwenden, wird bei unserer Methode das gesamte Volumen der Zielregion für die

Berechnung berücksichtigt und somit Pfade gezeigt, durch die das gesamte zu behandelnde Gebiet zu erreichen ist, ohne dass gefährdete Strukturen passiert werden. Dafür wird der zu behandelnde Bereich als volumetrische Lichtquelle in streuendem Medium (zum Beispiel Staub oder Nebel) gedacht. In der Natur bilden sich in so einer Situation sichtbare Lichtstrahlen. Diese Lichtstrahlen können zusammen mit den zu untersuchenden Volumensdatensätze durch die zuvor vorgestellten Methoden für die gleichzeitige Darstellung mehrerer volumetrischer Datensätze direkt im dreidimensionalen Raum und zusätzlich auf beliebigen Schnittebenen ohne Mehraufwand und in Echtzeit für die Planung eines Eingriffes angezeigt werden. Abbildung 4 zeigt die Anwendung dieser Methode für ein bereits jetzt im Einsatz befindliches Anwendungsszenario für die minimal invasive Behandlung von Leberkrebs. Abbildung 4 zeigt ein weiteres mögliches Szenario für nicht-medizinische Anwendungen.

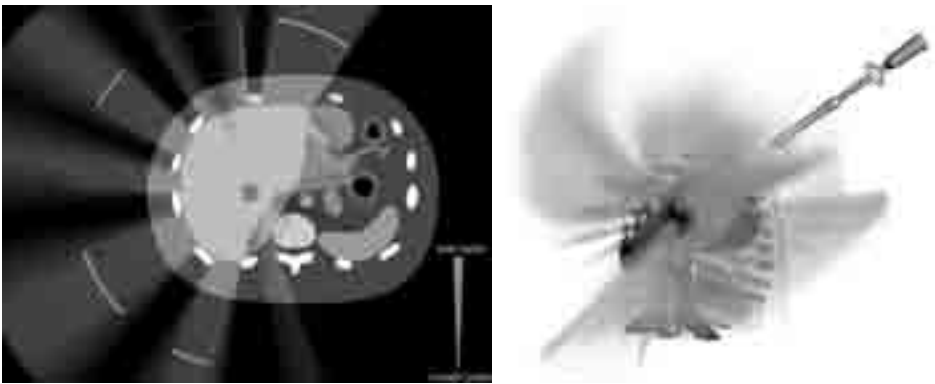


Abbildung 4: Ein Anwendungsbeispiel für die entwickelten Visualisierungs- und Darstellungsalgorithmen. Eine zu behandelnde pathologische Veränderung wird als helle Lichtquelle betrachtet und das umgebende Medium als streuend berechnet. Alle möglichen Zugangswege werden so als Volumendatensatz berechnet und zeigen die Sicherheit der Wege zu der zu behandelnden Strukturen auf einen Blick durch Abschattung und Farbgebung. Die hybride Visualisierung in 2D sowie in 3D erlaubt es außerdem auch den Weg zu finden, der für den Patienten am sichersten ist und gleichzeitig den größten Handlungsspielraum bietet.

## 5 Ergebnisse

Diese Dissertation beschreibt und evaluiert verschiedene vom Autor entwickelten Methoden um direkte dreidimensionale Bildsynthese in der klinische Praxis nutzbar zu machen. Dabei konnten die getroffenen Annahmen durch folgende Forschungsergebnisse bestätigt werden.

Durch eine Vorabevaluierung mit mehr als zwei Dutzend Medizinern, die auf mehr als fünf Jahre Erfahrung in ihrem Fachgebiet zurückblicken können, konnte die Nützlichkeit und vor allem die zukünftige Unentbehrlichkeit von direkter dreidimensionaler Bildsynthese



Abbildung 5: Ein volumetrischer Datensatz wie er in Maschinenbaustudien verwendet wird. Gleichzeitig wird ein Volumen dargestellt, das die Zugangsmöglichkeiten zu einem schwer erreichbaren Bereich visualisiert. Beachten Sie die nicht auf der Hand liegende Zugangsmöglichkeit im unteren Bereich.

für viele medizinische Prozeduren gezeigt werden.

Auf technischer Ebene zeigt diese Arbeit als erste wie mehrere volumetrische Datensätze gleichzeitig in derselben Szene in Echtzeit dargestellt werden können. Es wird außerdem gezeigt wie dieser Algorithmus einfach erweitert werden kann um komplexe geometrische Operationen darauf auszuführen (wie zum Beispiel virtuelle Schnitte mit nichttrivialer Geometrie). Dieser Algorithmus ist von sich aus in der Lage, ohne sonst nötige berechnungsintensive Erweiterungen, zusätzlich zu Volumsdaten transparente Objekte ebenfalls in Echtzeit darzustellen. Die Flexibilität der vorgestellten Methoden wird außerdem durch eine Weiterentwicklung der Echtzeitberechnung von physikalisch approximierten Lichtstreuungseffekten gezeigt.

Um die Berechnungsgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, wurden in dieser Arbeit geometrische Charakteristiken auf deren Relevanz für die Bildwahrnehmung im menschlichen visuellen System untersucht und nach deren Wichtigkeit gereiht. Die Ergebnisse dieser Evaluierung wurden dazu genutzt um bestimmte Bildteile nicht berechnen zu müssen sondern stattdessen aus benachbarten (wichtigen) Bereichen zu interpolieren. Damit wurde im ersten Schritt eine signifikante Erhöhung der Bilderzeugungsrate erreicht und im zweiten Schritt ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht eine bestimmte minimale Bilderzeugungsfrequenz bei bestmöglichem visuell wahrnehmbarem Ergebnis zu garantieren.

Die vorgestellten Methoden wurden in konkreten Anwendungen für die klinische Praxis evaluiert und von klinischen Experten für gut befunden. So wurde zum Beispiel die Darstellung mehrerer Volumetrischer Datensätze in derselben Szene dazu genutzt, alle möglichen Zugangspfade minimal invasiver Eingriffe, die mehrere Bildgebungsmodalitäten erfordern, zusammen mit deren Sicherheit für den Patienten genutzt (vergleiche Abbil-

dung 4). Außerdem wurden die entwickelten Echtzeitbildarstellungsmethoden dazu verwendet, die Position von zuvor als bösartig klassifiziertem Gewebe in einem späteren Eingriff mit sehr hoher Genauigkeit wiederzufinden. Es wurde auch gezeigt, dass es mit den entwickelnden Algorithmen möglich ist, Abhängigkeiten zwischen gleichzeitig dargestellten Datensätzen automatisch zu erkennen und entsprechend zu visualisieren.

## 6 Fazit

Alle Teile dieser Arbeit wurden vollständig von Experten aus den Bereichen Medizin und Informatik evaluiert. Dabei sind vorläufige Ergebnisse dieser Arbeit in renommierten internationalen Journalen und Konferenzen des jeweiligen Fachgebiets vorgestellt worden. Artikel in “ACM Transactions on Graphics” und “Circulation: Cardiovascular Imaging” sind nur zwei prominente Beispiele für über ein Dutzend von Experten begutachtete, wissenschaftliche Publikationen, die aus dieser Dissertation direkt hervorgegangen sind.

Die praktischen und theoretischen Ergebnisse bescheinigen den vorgestellten Methoden nicht nur deren Gültigkeit, sondern auch deren direkte Anwendbarkeit auf vielfältige Szenarien aus der klinischen Praxis. Durch die enge Zusammenarbeit mit Institutionen wie dem LKH Graz, dem ZMF Graz, der Universitätsklinik Leipzig, der Oxford University, der Fraunhofer-Gesellschaft, der Aalto University Helsinki, SIEMENS HealthCare und SIEMENS Corporate Research ist bereits jetzt die wissenschaftliche Weiterverwendung und wirtschaftliche Auswertung der entstandenen Algorithmen im Gange. In einem Folgeprojekt wird nun verstärkt die menschliche Wahrnehmung und deren Ausnutzung in Kombination mit den zu erwartenden Hardwareentwicklungen für noch effizientere strahlenbasierte Algorithmen erforscht werden.

Überblicksvideos der einzelnen vorgestellten Methoden stehen auf youtube zur Verfügung (Kommentar auf Englisch):

*minimalinvasive Zugangs-  
pfadplanung:*

<http://www.youtube.com/watch?v=mHO6gCm9EP4>



*wahrnehmungsbasierte  
Optimierung:*

[http://www.youtube.com/watch?v=HjZYv\\_FaPSI](http://www.youtube.com/watch?v=HjZYv_FaPSI)



*vielfache Volumen, Dar-  
stellungsalgorithmus:*

<http://www.youtube.com/watch?v=2Ym0CoJ0pVk>



## Literatur

[AMHH08] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines und Natty Hoffman. *Real-Time Rendering 3rd Edition*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2008.

- [Lev90] Marc Levoy. Efficient ray tracing of volume data. *ACM Trans. Graph.*, 9:245–261, July 1990.
- [LMK03] Wei Li, Klaus Mueller und Arie Kaufman. Empty Space Skipping and Occlusion Clipping for Texture-based Volume Rendering. In *Proceedings of IEEE Visualization*, Seiten 317–324, 2003.
- [McC88] B. H. McCormick. Visualization in scientific computing. *SIGBIO Newsl.*, 10:15–21, March 1988.
- [MIH05] Manabu Matsui, Fumihiko Ino und Kenichi Hagihara. Parallel Volume Rendering with Early Ray Termination for Visualizing Large-Scale Datasets. In Jiannong Cao, Laurence Yang, Minyi Guo und Francis Lau, Hrsg., *Parallel and Distributed Processing and Applications*, Jgg. 3358 of *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 245–256. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [NR02] F. Natterer und E.L. Ritman. Past and future directions in x-ray computed tomography (CT). 12(4):175–187, 2002.
- [SHO<sup>+</sup>08] Weiwei Song, Shungang Hua, Zongying Ou, Hu An und Kaifeng Song. Octree Based Representation and Volume Rendering of Three-Dimensional Medical Data Sets. In *Proceedings of the 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics - Volume 01*, Seiten 316–320, 2008.
- [UH91] Jayaram K. Udupa und Gabor T. Herman, Hrsg. *3D imaging in medicine*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1991.
- [Wei06] Daniel Weiskopf. *GPU-Based Interactive Visualization Techniques (Mathematics and Visualization)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2006.



**Bernhard Kainz** wurde am 27. Januar 1982 in Fürstenfeld (Steiermark, Österreich) geboren. Nach Absolvierung der Hochschulreife am BG/BRG Fürstenfeld und dem darauf folgenden Präsenzdienst (2001) absolvierte er das Studium der Telematik in den Fachrichtungen *Biomedical Engineering* und *Computer Graphics and Vision* an der Technischen Universität Graz. Er erhielt die akademischen Grade bakk.techn. (B.Sc.) 2005 und Dipl.-Ing. (DI, M.Sc.) 2007 mit Auszeichnung und begann danach das Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften unter Professor Dieter Schmalstieg, das er 2011 ebenfalls mit Aus-

zeichnung abschloss. Seine aktuellen Forschungsinteressen sind volumetrische medizinische Bildgebungsverfahren und deren automatische Verarbeitung und Visualisierung in Echtzeit, Parallelprogrammierung von Bildverarbeitungsalgorithmen und die Verwendung von *Augmented Reality* Methoden in der klinischen Praxis. Neben mehr als zwei Dutzend veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen hat er in den letzten Jahren zur Akquirierung von mehreren hunderttausend Euro an Forschungsmitteln beigetragen und zahlreiche Studentenprojekte betreut. Seine aktuelle Forschung über priorisierte Zeitplanung paralleler Algorithmen wird vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unter der Projektnummer 23329 finanziert.