VisPME – Visualization in Parallel Manycore Environments

Schlussbericht

Hentschel, B., und Kuhlen, T.
Rechen- und Kommunikationszentrum der RWTH Aachen University

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01H08009B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Der Arbeitsschwerpunkt der RWTH Aachen University und des assoziierten Partners NVIDIA GmbH bestand im Rahmen dieses Projekts in der Entwicklung von parallelen Algorithmen zur interaktiven Partikelverfolgung. Um diese Methoden auch auf große, unstrukturierte Daten anwenden zu können, wurden Verfahren zur Datenreduktion entwickelt.

Das Particle Tracing ist eine ausgewiesene Methode zur Analyse komplexer Strömungsphänomene. Von besonderer Bedeutung ist vor allem die Bedienung per direkter 3D-Interaktion und die dafür notwendige Echtzeitfähigkeit der Berechnung, um das volle Potential dieser Methode auszuschöpfen. Daher wurden im Projekt Verfahren zur Partikelverfolgung für die parallele Compute Platform CUDA entwickelt.

Des Weiteren wurden Methoden zur Reduzierung unstrukturierter Tetraedergitter implementiert. Die Idee hierbei ist, große Rohdaten soweit zu reduzieren, dass sich mit Hilfe modernere Grafikhardware verarbeiten lassen; dies bedeutet insbesondere, dass sie in den Speicher der Grafikkarte passen müssen. Dabei sollen möglichst keine erkennbaren Darstellungs- oder Berechnungsfehler auftreten. Im Gegensatz zu bestehenden Algorithmen wurden in VisPME aktuelle Entwicklungen im Bereich des Parallelrechnens zur Effizienzsteigerung ausgenutzt.

Als exemplarische Anwendung der entwickelten Methoden diente aus dem Bereich der Medizin / Strömungsmechanik eine simulierte künstliche Blutpumpe. Künstliche Blutpumpen (engl. Ventricular Assist Device, kurz VAD) kommen zum Einsatz, um die natürliche Herzfunktion zu unterstützen und so die Wartezeit auf einen geeigneten Herzspender zu überbrücken. Die Dauernutzung eines solchen VADs ist jedoch nicht ohne eine Weiterentwicklung der aktuellen VAD-Technologie möglich. Der Hauptgrund hierfür liegt in der durch die künstliche Blutpumpe verursachten Blutschädigung (Hämolyse), bei der für den Körper giftige Stoffe erzeugt werden. Daher wird bei der Entwicklung von nächsten VAD-Generation nicht nur der hydraulische Aspekt, also das Strömungsverhalten, sondern insbesondere auch der hämatologische Aspekt berücksichtigt. Dabei besteht das Ziel darin, dass rote Blutkörperchen einer möglichst geringen Deformation beim Transport durch die Blutpumpe ausgesetzt sind und so nur geringen Schaden nehmen. Als Grundlage diente ein Tensor-basiertes Blutschädigungsmodell, das vom assoziierten Kooperationspartner (Prof. Marek Behr, AICES) speziell zur Hämolyseschätzung (ein Wert zur Messung der Schädigung der roten Blutkörperchen) innerhalb der Blutpumpe entwickelt wurde.

Im Verlauf des Projekts wurde ein weiteres Anwendungsfeld mit Kooperationspartnern am Forschungszentrum Jülich auf dem Gebiet der probabilistischen Traktographie erschlossen. Durch diffusionsgewichtete Magnetresonanzbildgebung können bevorzugte Richtungen von Wasserbewegungen im menschlichen Gehirn ermittelt werden. Diese Richtungsfelder lassen wiederum auf die Faserbahnstruktur und Konnektivität zurückschließen. Die Problemstellung bei der Analyse solcher Daten ist ähnlich der Strömungsexploration von CFD-Daten.

1.2 Voraussetzungen der Durchführung

Die Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens müssen sowohl aus infrastruktureller Sicht wie auch aus wissenschaftlicher Sicht als sehr gut zu bezeichnet werden. Mit dem am Rechen- und Kommunikationszentrum der RWTH Aachen installierten GPU-Cluster und der dort vorhandenen High End Visualisierungshardware (CAVE-Display) stand eine adäquate Infrastruktur zur Durchführung des Projekts zur Verfügung. Mit der vorhandenen Expertise im Bereich des Hochleistungsrechnens und in der Visualisierung konnten die Arbeitspakete ohne Einarbeitungszeiten zügig bearbeitet werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts war die Virtual Reality Group am Rechen- und Kommunikationszentrum der RWTH Aachen University an den Aktivitäten 2.1 (Particle Tracing), 2.2 (Parallele Reduktion von Tetraedergittern) und 4.3 (CFD/Medizin) beteiligt. Die Arbeitspakete konnten im Rahmen des im Projektantrag aufgeführten Zeitplans termingerecht abgeschlossen werden. In Abweichung vom Antrag wurde im Kontext des Arbeitspakets 4.3 mit der probabilistischen Traktographie ein weiterer Anwendungsbereich in das Projekt mit aufgenommen. Die bestehenden probabilistischen Verfahren in der Traktographie wurden auf Basis der in Arbeitspaket 2.1 entwickelten Many-Core-Parallelisierung des Particle Tracings erweitert und versetzen unsere Kooperationspartner aus den Neurowissenschaften erstmals in die Lage, neuronale Pfade in menschlichen Gehirn interaktiv zu berechnen und zu explorieren.

Im Rahmen der Aktivität 2.1 wurde eine CUDA-Implementierung für die Berechnung integraler Kurven in zeitvarianten Vektorfeldern umgesetzt. Aufgrund der Unabhängigkeit der Berechnung einzelner Partikelbahnen konnte eine sehr gute Skalierbarkeit beobachtet werden. Für Datensätze, deren Größe den verfügbaren Grafikkartenspeicher nicht überschreitet, wurde eine interaktive Verfolgung erreicht. Basierend auf dieser Technik wurde eine Integration in eine immersive, virtuelle Umgebung umgesetzt. Auf diese Weise ist es Benutzern nun möglich mittels direkter Interaktion komplexe, räumlich-zeitliche Strömungsdaten in Echtzeit zu analysieren.

Die zentrale Idee von Aktivität 2.2 bestand in der Entwicklung eines Dezimierungsverfahrens, mit dessen Hilfe auf Tetraedergittern gegebene Rohdaten derart vereinfacht werden können, dass sie bei minimalen Darstellungsfehlern deutlich weniger Speicherplatz benötigen. Hier wurde zunächst aus der Literatur ein geeignet erscheinendes Verfahren ausgewählt und umgesetzt. Dieses Verfahren reduziert ein Tetraedergitter sukzessiv, indem es einzelne Kanten auswählt, diese zusammenzieht und die lokale Nachbarschaft des Gitters entsprechend aktualisiert. Dabei werden immer mindestens drei Tetraeder zusammen gezogen. Basierend auf ersten Erfahrungen wurde dieses Verfahren um zusätzliche Tests für valide bzw. invalide Dezimierungsoperationen erweitert. Nur durch diese Erweiterungen konnte die Stabilität des Verfahrens derart erhöht werden, dass es auch auf komplexe Gitter mit inneren Aussparungen deutlich angewendet werden konnte.

Die Ergebnisse dieser beiden Arbeitspakete konnten letztes Jahr auf dem renommierten Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization (EGPGV11) veröffentlicht werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass

- die Implementierung des Particle Tracing mittels CUDA eine echtzeitfähige Berechnung sehr großer Mengen von Partikelbahnen auf instationären Tetraedergittern erlaubt,

- die Dezimierung zu einer linearen Skalierung der Partikelverfolgung mit der Datensatzgröße geführt hat,

- schon sehr geringe Dezimierungs-Faktoren unter Umständen zu sichtbaren lokalen Abweichungen in einzelnen Partikelbahnen führten die sich aufgrund der Fehlerfortpflanzung später in deutlichen Unterschieden niederschlugen. Allerdings zeigte eine statistische Untersuchung, dass die zugehörigen Gesamtpopulationen keine statistisch signifikanten Unterschiede aufwiesen.

Aktivität 4.3 hatte zum Ziel, die entwickelten Techniken im Rahmen verschiedener, realer Anwendungsfälle zu evaluieren. Hierbei konzentrierten sich die Auswertungen auf zwei unterschiedliche Szenarien: die Analyse der Blutschädigung in künstlichen Blutpumpen basierend auf CFD-Simulationen und die Untersuchung von Faserbahnen im menschlichen Gehirn basierend auf DT-MRI Aufnahmen.

Die Ergebnisse für die Untersuchung der Blutschädigung in künstlichen Blutpumpen sind in der EGPGV-Publikation zusammengefasst. Wesentliche Herausforderungen ergaben sich hier dadurch, dass die Simulationen mit unstrukturierten und zeitveränderlichen Gittern durchgeführt wurden. Das Problem der Zell-Lokalisierung wurde über ein zweiphasiges Suchschema, basierend auf einer Baumsuche gefolgt von einem kurzen „Tetrahedral Walk“, gelöst. Da die Datensätze der Simulationen hier deutlich größer sind als der auf der GPU verfügbare Speicherplatz, wurden die Gitter mit Hilfe der in Aktivität 2.2 entwickelten Reduktionsverfahren vereinfacht. Hierdurch konnte ein Echtzeit Particle Tracing selbst für diese komplexen Simulationen realisiert werden, welches intensiv zur explorativen Analyse und schließlich zur Weiterentwicklung und Optimierung der Blutpumpen zusammen mit den industriellen Partnern der AICES Graduiertenschule genutzt wird (siehe Abbildung 1).

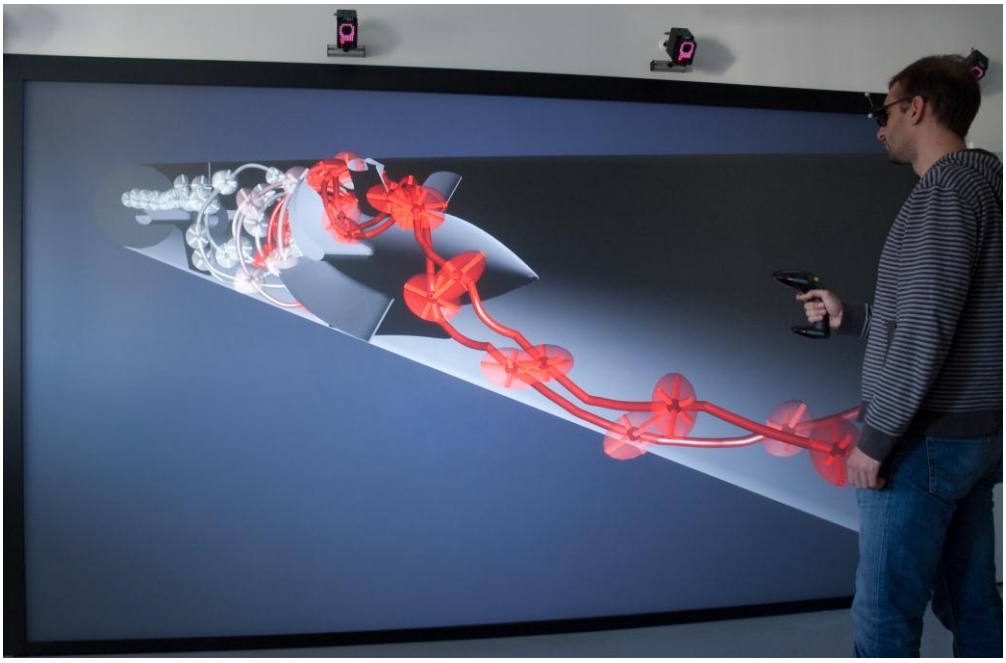

Abbildung 1: Exploration von Strömungsdaten in simulierten Blutpumpen auf der hochaufgelösten PowerWall der AICES Graduiertenschule

Die Übertragung der in VisPME entwickelten Algorithmen auf den Anwendungsfall der probabilistischen Traktographie war im ursprünglichen Projektplan nicht vorgesehen. Eine interaktive Exploration probabilistischer Traktograhiedaten würde Neurowissenschaftler einen entscheidenden Vorteil bei der Konnektivitätsanalyse bieten, scheiterte aber bislang insbesondere an der Verfügbarkeit schneller algorithmischer Umsetzungen für diese rechenintensive Methode. Über die in VisPME entwickelten Many Core Parallelisierungen konnten die Berechnungsverfahren soweit beschleunigt werden, dass den Neurowissenschaftlern nun ein fortschrittliches Werkzeug zur Verfügung steht, mit dessen Hilfe Hirnregionen interaktiv ausgewählt und die zugehörigen neuronalen Pfade in Echtzeit verfolgt werden können (siehe Abbildung 2). Dieses Werkzeug wird von den Anwendern derzeit in aktuellen Forschungsprojekten der Jülich Aachen Research Alliance intensiv genutzt. So konnten mit Hilfe der Methoden neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Neurowissenschaften gewonnen werden, die in angesehenen Zeitschriften (NeuroImage und Journal of Neuroscience) publiziert wurden.

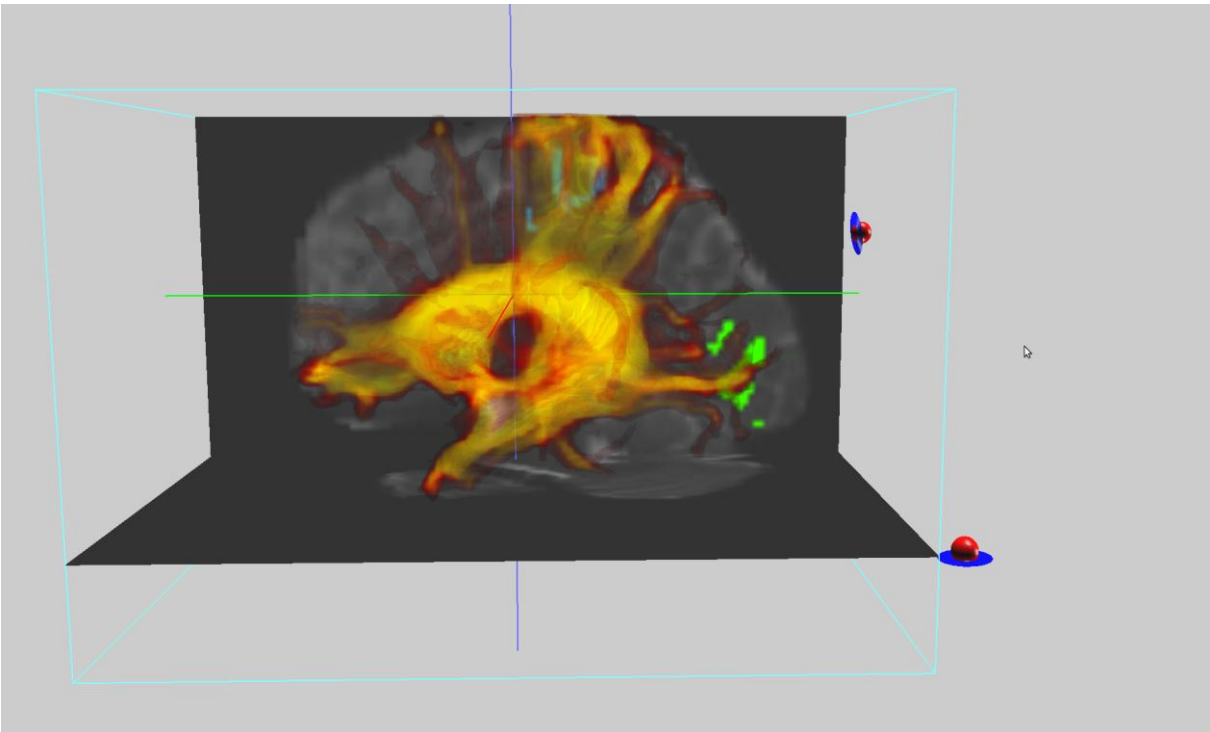

Abbildung 2: Interaktive berechnete neuronale Pfade in der probabilistischen Traktographie

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Stromlinien oder Bahnlinien sind eine wirkungsvolle und daher weitverbreitete Technik für die Analyse von Vektorfeldern. Typischerweise sind für eine aussagekräftige Visualisierung von Strömungsstrukturen große Mengen von Partikelbahnen erforderlich; entsprechend erfordern die zu Grunde liegenden Berechnungen hohe Rechenleistung. Daher war der Einsatz von Particle Tracing Verfahren in hoch-interaktiven Umgebungen bisher stark eingeschränkt. Selbst eine Beschleunigung der eigentlichen Berechnung ermöglicht lediglich die Verwendung kleinerer Partikelzahlen in einem interaktiven Kontext. Alternative Ansätze basieren auf einer Vorberechnung von Partikelbahnen – entweder für automatisch berechnete Saatpunkte gefolgt von einer interaktiven Darstellung, oder für eine vollständige Berechnung sämtlicher relevanten Partikelbahnen, aus denen der Benutzer im eigentlichen Analyseprozess interaktiv die aktuell interessanten auswählt. Beide Ansätze schränken jedoch die Interaktivität ein bzw. verursachen einen erheblichen Mehraufwand für die Speicherung von Partikelinformationen.
Erst die Nutzung programmierbarer Grafikhardware – wie im vorliegenden Projekt – ermöglicht den hoch-interaktiven Einsatz von Particle Tracing für die Exploration von Strömungsphänomenen. Allerdings sind die bekannten Verfahren in zweierlei Hinsicht beschränkt: sie erlauben entweder die Exploration rein stationärer Strömungen auf strukturierten oder unstrukturierten Gittern, oder aber die Untersuchung instationärer Strömungen auf stationären, d.h. nicht zeit-veränderlichen Gittern. Darüber hinaus sind in beiden Fällen Einschränkungen bezüglich der Datensatzgröße zu beachten.

Für die Reduktion von Strömungsdaten auf handhabbare Größen werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Eine Konvertierung der gesamten Strömungsdomäne bzw. einer Fokusregion in ein kartesisches Gitter in einem Vorverarbeitungsschritt schränkt den Umfang und insbesondere die Genauigkeit der zu untersuchenden Daten stark ein. Eine Simplifizierung von Tetraedergittern erlaubt hingegen eine sehr hochwertige Approximation der Ursprungsdaten bei deutlich geringerem Speicherbedarf. Allerdings verhindern lange Rechenzeiten hier den direkten Einsatz in einem interaktiven Kontext.

1.5 Zusammenarbeit

Die im Projektplan angegebenen Ziele konnten nur über eine Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erzielt werden. Eine besonders enge Zusammenarbeit bestand mit der Graduiertenschule AICES (Aachen Institute for Advanced Studies in Computational Engineering Science) an der RWTH Aachen zur Nutzbarmachtung der im Projekt entwickelten parallelen Particle Tracing Verfahren und ihrer Erweiterung auf das von AICES entwickelte Blutschädigungsmodell. Sehr wertvoll war zudem die Kooperation mit der NVIDA GmbH als assoziierter Projektpartner. Ohne die Unterstützung des Unternehmens mit seiner genauen Kenntnisse der Prozessorarchitektur wären Probleme bei der Implementierung der Algorithmen ungelöst geblieben. Durch die Aufnahme der probabilistischen Traktographie in das Projekt ergaben sich im Verlauf des Projekts weiterhin inhaltliche Anknüpfungspunkte mit dem Max-Planck-Institut für neurologische Forschung Köln, an die zu Projektbeginn gar nicht gedacht wurde.

Über die Kooperation mit den Projektpartnern hinaus führten die entwickelten Lösungen insbesondere zu einer fruchtbaren Zusammenarbeit mit dem Institut für Neurowissenschaften am Forschungszentrum Jülich im Bereich der probabilistischen Traktographie. Des Weiteren konnte eine wertvolle informelle Zusammenarbeit mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory zum parallelen Particle Tracing in großen Datensätzen initiiert werden (siehe auch Abschnitt 2.5, Fortschritt bei anderen Stellen).

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde gemäß Projektplan für die von der RWTH Aachen zu leistenden Arbeitspakete verwendet. Wie im Projektplan vorgesehen wurden die Arbeiten im Rahmen einer Doktorandenstelle (E13) durchgeführt.

2.2 Überblick über den zahlenmäßigen Nachweis

Tabelle mit zahlenmäßigem Verwendungsnachweis:

	Bewilligt	Verausgabt
Gehälter 0812	162.288,00 €	164.840,00 €
Verwaltungskosten 0843	3.000,00 €	0,00 €
Reisekosten 0846	2.100,00 €	2.265,61 €
	167.388,00 €	167.105,61€

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Vor dem Hintergrund der angestrebten Ziele sowie der Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse insbesondere im Hinblick auf die Exzellenzinitiative und den geschaffenen neuen Möglichkeiten einer interaktiven, intuitiven Analyse komplexer Strömungsdaten war der an der RWTH Aachen University im Rahmen des Projekts geleistete Aufwand angemessen.

2.4 Verwertbarkeit und Voraussichtlicher Nutzen

Durch die entwickelten Verfahren für eine hoch-effiziente Partikelverfolgung samt partikelbasierter Kenngrößen wird die Berechnung großer Mengen von Partikelbahnen, gefolgt von einer statistischen Auswertung einer entsprechenden räumlichen Verteilung, erst innerhalb einer vom Benutzer akzeptablen Wartezeit möglich. Dadurch ergeben sich potenziell neue Erkenntnisse, die ein Verständnis der den Daten zu Grunde liegenden Phänomene deutlich erleichtern.

Eine unmittelbare Vermarktung der entwickelten Methoden ist zwar nicht geplant und wurde im Antrag auch nicht in Aussicht gestellt. Da die entwickelten Methoden aber in die an der RWTH Aachen University aktiv entwickelten OpenSource-Software ViSTA FlowLib integriert wurden, stehen diese in einem größeren Rahmen der universitären wie auch der industriellen Forschung zur Verfügung. Insbesondere werden die beteiligten Antragsteller auch in Zukunft Projekte zusammen mit anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie durchführen, in denen die im Projekt entwickelten Algorithmen zum Particle Tracing und zur Gitter-Reduktion gewinnbringend eingesetzt werden.

Mit der Verwertung durch die AICES Graduiertenschule sowie die Neurowissenschaftler am Forschungszentrum Jülich in praxisreifen komplexen Applikationen konnte der Nutzen der entwickelten Lösungen untermauert werden. Die Simulation künstlicher Blutpumpen und deren Visualisierung über interaktives Particle Tracing sowie die Echtzeit-Traktographie neuronaler Pfade im menschlichen Gehirn führten zu einem signifikanten Erkenntnisgewinn über die simulierten Phänomene und wurden außerdem mit großem Erfolg auf der International Supercomputing 2010 bzw. 2011 einem größeren Publikum vorgestellt. Auch konnten die Verfahren von den universitären sowie den industriellen Partnern im Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" zur explorativen Analyse eines simulierten Kunststoffbauteils genutzt werden.

2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Die schnelle Berechnung großer Partikelpopulationen gewinnt als Analysemethode im Bereich der Untersuchung von Strömungsphänomenen immer weiter an Bedeutung. Deshalb wurde an Methoden der Partikelvisualisierung durchaus auch in anderen Forschergruppen gearbeitet. Den Antragstellern sind aber insbesondere keine anderen Lösungen bekannt, die über einen GPU-basierten Many Core Ansatz ein Echtzeit Particle Tracing für größere Datensätze auf unstrukturierten Gittern in immersiven Umgebungen – und der damit einhergehenden niedrigen Latenz – realisieren. Andere Arbeiten auf diesem Gebiet zielen in der Regel auf einen allgemeinen Speed-up ab. Im Wesentlichen sind hier die Arbeiten am Lawrence Berkeley National Lab in Kooperation mit der University of California at Davis im Bereich des hybrid-parallelen multi-core Particle Tracing zu nennen. Mit diesen Gruppen wurde von den Antragstellern in den letzten Jahren eine informelle Zusammenarbeit aufgebaut.

Die wesentlichen methodischen Ergebnisse der Antragsteller konnten 2011 auf dem renommierten und kompetitiven (Annahmequote eingereichter Beiträge ca. 40 Prozent) Eurographics Symposium for Parallel Graphics and Visualization publiziert werden und belegen somit einen Vorsprung vor anderen Forschergruppen. Das Symposium ist weltweit anerkannt als der führende Event in den Bereichen der parallelen Graphik und Visualisierung.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

T. Rick, T. Kuhlen (2009).
Interactive Particle Tracing in Parallel Manycore Environments. Research Poster at the International Supercomputing Conference (ISC 2009), Hamburg.

D. Kempin, P. Schumacher, G. Ziegler, T. Rick (2009).
Interactive Particle Tracing with Cumulative Blood Damage Computation for Ventricular Assist Devices. In Proceedings of the 6th GI Workshop on Virtual and Augmented Reality, pp. 165-176.

T. Rick, A. von Kapri, S. Caspers, S. B. Eickhoff, K. Zilles, T. Kuhlen (2009).
Interactive Visualization of Uncertainty in Probabilistic Tractography of Brain's White Matter Pathways as assessed by Diffusion Tensor Imaging. IEEE Visualization 2009 Poster.

M. Bußler, T. Rick, A. Kelle-Emden, B. Hentschel, T. Kuhlen (2011).
Interactive Particle Tracing in Time-Varying Tetrahedral Grids. In Proceedings of the Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization, pp. 71-80.

T. Rick, A. von Kapri, S. Caspers, K. Amunts, K. Zilles, T. Kuhlen (2011).
Visualization of Probabilistic Fiber Tracts in Virtual Reality. In J. Westwood et al. (Eds.): Studies in Health Technology and Informatics 163, IOS Press, pp. 486-492.

S. Caspers, S.B. Eickhoff, T. Rick, A. von Kapri, T. Kuhlen, R. Huang, N.J. Shah, K. Zilles (2011).
Probabilistic Fibre Tract Analysis of Cytoarchitectonically Defined Human Inferior Parietal Lobule Areas Reveals Similarities to Macaques. NeuroImage 58(2), pp. 362-380.

Aachen, 18. Oktober 2012

Prof. Dr. Torsten Kuhlen

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht für das Projekt VisPME – Visualization in Parallel Manycore Environments	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Hentschel, Bernd Prof. Dr. Kuhlen, Torsten	5. Abschlussdatum des Vorhabens 12/2011
	6. Veröffentlichungsdatum 10/2012
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen University, Rechen- und Kommunikationszentrum Seffenter Weg 23 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01IH08009D
	11. Seitenzahl 9
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 6
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 2
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Das Particle Tracing ist eine ausgewiesene Methode zur Analyse komplexer Strömungsphänomene. Von besonderer Bedeutung ist vor allem die Bedienung per direkter 3D-Interaktion und die dafür notwendige Echtzeitfähigkeit der Berechnung, um das volle Potential dieser Methode auszuschöpfen. Daher wurden im Projekt Verfahren zur Partikelverfolgung für die parallele Compute Platform CUDA entwickelt. Im Vergleich zu bestehenden Algorithmen wurden in VisPME aktuelle Entwicklungen im Bereich des Parallelrechnens zur Effizienzsteigerung ausgenutzt.

Des Weiteren wurden Methoden zur Reduzierung unstrukturierter Tetraedergitter implementiert. Die Idee hierbei ist, große Rohdaten soweit zu reduzieren, dass sich mit Hilfe modernere Grafikhardware verarbeiten lassen. Dabei sollen möglichst keine erkennbaren Darstellungs- oder Berechnungsfehler auftreten.

Als exemplarische Anwendung der entwickelten Methoden diente aus dem Bereich der Medizin / Strömungsmechanik eine simulierte künstliche Blutpumpe. Künstliche Blutpumpen (engl. Ventricular Assist Device, kurz VAD) kommen zum Einsatz, um die natürliche Herzfunktion zu unterstützen und so die Wartezeit auf einen geeigneten Herzspender zu überbrücken. Als Grundlage diente ein Tensor-basiertes Blutschädigungsmodell, das vom assoziierten Kooperationspartner (Prof. Marek Behr, AICES) speziell zur Hämolyseschätzung (ein Wert zur Messung der Schädigung der roten Blutkörperchen) innerhalb der Blutpumpe entwickelt wurde.

Im Verlauf des Projekts wurde ein weiteres Anwendungsfeld mit Kooperationspartnern am Forschungszentrum Jülich auf dem Gebiet der probabilistischen Traktographie erschlossen. Durch diffusionsgewichtete Magnetresonanzbildgebung können bevorzugte Richtungen von Wasserbewegungen im menschlichen Gehirn ermittelt werden. Diese Richtungsfelder lassen wiederum auf die Faserbahnstruktur und Konnektivität zurückschließen. Die Problemstellung bei der Analyse solcher Daten ist ähnlich der Strömungsexploration von CFD-Daten.

19. Schlagwörter Visualisierung, Particle Tracing, High Performance Computing	
20. Verlag	21. Preis