

Zwischenbericht 4

Zusammenfassender Bericht	01IH08003 A-E / SKALB
Lattice-Boltzmann-Methoden für skalierbare Multi-Physik-Anwendungen	
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2009 – 31.12.2011
Berichtszeitraum:	01.07.2010 – 31.12.2010

Beteiligte Projektpartner:

- RRZE Regionales Rechenzentrum Erlangen
- LSS Lehrstuhl für Systemsimulation der Universität Erlangen-Nürnberg
- HLRS Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart
- iRMB Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen der Technischen Universität Braunschweig
- TU-Do Lehrstuhl für Angewandte Mathematik und Numerik zusammen mit dem IT und Medien Centrum der Technischen Universität Dortmund
- IANUS IANUS Simulation GmbH

Projektkoordinator:

Prof. Dr. Gerhard Wellein
Regionales Rechenzentrum Erlangen
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 1, 91058 Erlangen

Erlangen, 28. Feb. 2010

Vorwort

Das Verbundprojekt *Lattice-Boltzmann-Methoden für skalierbare Multi-Physik-Anwendungen (SKALB)* wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Initiative *HPC Software für skalierbare Parallelrechner* unter dem Förderkennzeichen 01IH08003 gefördert. Projektstart von SKALB war der 1. Januar 2009. Während der dreijährigen Förderung haben sich die Projektpartner das Ziel gesetzt, gemeinsam die effiziente Implementierung und Weiterentwicklung von Lattice-Boltzmann basierten Strömungslösern zur Simulation komplexer Multi-Physik-Anwendungen auf Rechnern der

Petascale-Klasse voranzutreiben. Dieser Bericht fasst wesentliche Aktivitäten und Ergebnisse des dritten Projekthalbjahres zusammen.

Lattice-Boltzmann-Methoden haben sich in den letzten Jahren als Standardverfahren für numerische Strömungssimulationen etabliert. Besonders bemerkenswert ist, dass dieser Ansatz schnell breite Verwendung auch jenseits der klassischen CFD-Anwendungen gefunden hat und so zum Beispiel in der Verfahrenstechnik oder der Biomedizin eingesetzt wird. Deutschland konnte sich neben den USA als weltweit führend bei der numerischen Umsetzung der Methode insbesondere im Bereich der Hochleistungsrechner etablieren. Um diese führende Stellung auch bei den nun absehbaren technologischen Veränderungen erhalten zu können, haben sich fünf Gruppen aus ganz Deutschland mit ausgewiesener Expertise in den Bereichen Lattice-Boltzmann-Methoden und Höchstleistungsrechnen für das Verbundprojekt SKALB zusammengeschlossen. Bestehende Lattice-Boltzmann-Verfahren sollen so zur Lösung praxisrelevanter Multi-Physik-Anwendungsfälle auf hochskalierenden Parallelrechnern erweitert und optimiert werden. Dabei werden alle Schritte vom Preprocessing über die Simulation bis hin zur Visualisierung adressiert. Mit Blick auf neue und sich abzeichnende (heterogene) Multi-/Many-Core Architekturen sollen schließlich Potenziale und Programmieransätze exemplarisch evaluiert werden. Die umfangreiche Beteiligung assoziierter Unternehmen sichert dem Projekt den Zugriff auf neueste Hardwaretechnologien sowie den Transfer der methodischen Erkenntnisse und Simulationstechniken in die Wirtschaft.

1 Organisatorisches

Die Koordination und Kooperation zwischen sechs Partnern an vier verschiedenen Orten herzustellen und aufrechtzuerhalten, ist von großer Bedeutung für das vorliegende Projekt.

Am Statusseminar des BMBF/Projektträgers im Dezember in Berlin haben Mitarbeiter aller an SKALB beteiligten Gruppen teilgenommen, so dass am Rande der Veranstaltung auch Abstimmungen der Projektbearbeitung erfolgen konnten. Die Vorstellung des Projekts SKALB übernahmen Prof. Wellein vom RRZE (wissenschaftliche Arbeiten und Ergebnisse) sowie Dr. Platte von IANUS (Benchmark-/Showcases und wirtschaftliche Ausichten), die dabei auf Ergebnisse aller SKALB-Partner eingingen.

Darüber hinaus gab es wieder bilaterale Treffen, Treffen mit assoziierten Projektpartnern sowie Videokonferenzen, wobei die thematischen Schwerpunkte im wie bereits im letzten Berichtszeitraum auf den Themen “GPU-Programmierung” und “BASF-Showcase” lagen.

Projektskizzen der SKALB-Partner, die SKALB-Ergebnisse in der einen oder anderen Form für andere Communities weiterentwickeln wollten, waren in der Vorrunde des zweiten BMBF-HPC-Calls nur mäßig erfolgreich: Ausschließlich die Projektskizze FETOL (Eine fehler-tolerante Umgebung für peta-scale MPI-Löser), bei welcher der VirtualFluids-Code des iRMB zentraler Bestandteil ist, wurde für die Hauptrunde zugelassen.

An einer anderen Skizze, die Lattice-Boltzmann-Verfahren einsetzen will und die für die Hauptrunde des zweiten BMBF-Calls zugelassen wurde, ist leider kein SKALB-Partner beteiligt, so dass derzeit unklar ist, wie ein direkter Wissenstransfer über die Laufzeit von SKALB hinaus erfolgen kann, da insbesondere Reisemittel für gemeinsame Treffen fehlen.

2 Wissenschaftliche Ergebnisse

2.1 WP1: Untersuchungen an prototypischen Benchmarkkernen und Optimierung der LB-Applikationen

Evaluierung paralleler Programmiermodelle In exemplarischen Benchmark-Kernen wurde begonnen, die Performance von OpenMP, OpenCL und CUDA auf verschiedenen Hardware-Plattformen zu vergleichen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die erzielte Performance von OpenCL auf CPUs und GPUs vergleichbar ist mit OpenMP auf CPUs und CUDA auf Nvidia-GPUs. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Unterschiede in den CPU- und GPU-Architekturen jeweils speziell auf GPU und CPU angepasste OpenCL-Kernel verwendet werden müssen.

Performancemodellierung Für einfache Genauigkeit zeigen grundlegenden Performancemodellierungen, dass ohne Vektorisierung der LBM-Berechnungen auf CPUs keine Sättigung aufgrund der Speicherbandbreite zu erwarten ist, sondern die Limitierung im Instruktionsthroughput liegt. Das Problem der Instruktionssättigung besteht ebenfalls bei hocheffizienten Cachegeblockten Implementierungen, die durch Mehrfachberechnung und Ausnutzung der Cachehierarchie den Druck auf das Speichersubsystem senken sollen.

Optimierung bestehender Codes für Standardarchitekturen Auf Basis so genannter Line-Kernel wurde am RRZE die Möglichkeit der vollständigen, automatischen Vektorisierung untersucht. Eine verbesserte Optimierung durch den Compiler wurde zwar beobachtet, jedoch keine vollständige Vektorisierung. Im nächsten Schritt wurde daher ein LBM-Kernel von Hand auf C-basierte SSE2-Intrinsic-Befehle umgestellt, um in jedem Falle eine Vektorisierung zu erreichen. Dadurch sind sowohl die Untersuchung des Instruktionsthroughputs verschiedener CPUs als auch die explizite Evaluierung von sogenannten aligned und unaligned Loads und Stores sowie der non-temporal Stores auf CPUs möglich.

Optimierung der Kommunikation von kleinen Fragmenten im gemeinsamen Speicher Das HLRS hat die Open MPI-Implementierung durch Änderungen an der Konfiguration angepasst (Open MPI Trunk rev 24047), um Thread-Safe kompilieren und ausführen zu können. Die entsprechend veränderte Open MPI-Bibliothek wurde mit dem Tool *helgrind* auf den Clustern des HLRS auf Korrektheit geprüft und mit Standard

Benchmarks getestet. NetPipe zeigt eine erwartete Verschlechterung der Kommunikationslatenz von Open MPI, auf einem Knoten zwischen zwei Sockets ohne Threadsupport $0.72 \mu\text{sec}$ gegenüber $0.83 \mu\text{sec}$ mit Threadsupport. Weiterhin wurden einfache Anwendungsbenchmarks mit dieser Open MPI-Version durchgeführt. Die Effizienz zum Beispiel des NAS/BT-Benchmarks mit zwei OpenMP-Threads je MPI-Prozess reduziert sich um ca. 10%, sowie um 15% mit vier OpenMP-Threads je MPI-Prozess. Die Verschlechterung der Effizienz erklärt sich durch das notwendige Locking innerhalb der MPI-Bibliothek und durch zusätzliche Barriers. Die Arbeiten an einer Thread-Safe-Implementierung von Open MPI weisen weit über das SKALB-Projekt hinaus. Hybride Programmierung wird sich durch die Vervielfachung von Cores in den Rechenknoten aufdrängen.

2.2 WP2: Weiterentwicklung von LB-Methoden für praktische Anwendungen auf hochskalierenden Systemen

Datenstrukturen Das im letzten Zwischenbericht von iRMB vorgestellte Verfahren *EsotericTwist* wurde in den patch-basierten VirtualFluids-Code für ein D3Q27-Modell integriert. Ergänzend dazu wurde eine D3Q19-Version für die GPU sowohl uniform als auch nicht uniform entwickelt. Der *EsotericTwist*-Ansatz arbeitet mit einem einzigen Satz von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und kann so den benötigten Speicherbedarf um bis zu 50% reduzieren.

Eine neue kompakte, lokale Randbedingung zweiter Ordnung wurde ebenfalls in den patch-basierten VirtualFluids-Code integriert. Diese ist für *EsotericTwist* optimiert und eignet sich besonders für eine Implementierung auf GPUs.

Gebietszerlegung und Lastbalanzierung Die Arbeiten von RRZE und LSS an einer optimierten Gebietszerlegung und Lastbalanzierung wurden im abgelaufenen Berichtszeitraum mit umfangreichen Performancestudien fortgesetzt und durch komplementäre Arbeiten vom iRMB ergänzt. In VirtualFluids wurde eine erste Variante der dynamischen Lastbalanzierung realisiert. Der Performancegewinn aufgrund einer besseren Lastbalanzierung liegt im Bereich von bis zu 30%.

Preprocessing und Visualisierung Am HLRS wurde ein SMP-paralleler Voxelierer entwickelt, der neben der Diskretisierung eines Objekts durch Voxel auch sogenannte “q-Werte” berechnet, welche zur besseren Approximation des Randes dienen. Hiermit wurden die STL-Geometrien der BASF-Showcases aus WP5 diskretisiert. Die schon im letzten Zwischenbericht vorgestellten Arbeiten am Computational Framework *Steereo* wurden fortgeführt und die Software quelloffen verfügbar gemacht.

2.3 WP3: Verbesserte numerische Ansätze

Softwarepaket FEAST Nachdem in der ersten Hälfte der Projektlaufzeit wesentliche Erkenntnisse im Bereich der Ausnutzung (heterogener) Mehr- und Vielkernarchitekturen für LBM-basierte Software gewonnen werden konnten, kamen diese im aktuellen Berichtszeitraum direkt der Neu- bzw. Weiterentwicklung des Softwarepaketes FEAST zugute. Ziel bleibt dabei eine Synthese von grobskaliger Parallelisierung auf Basis von MPI anhand von Gebietszerlegungsverfahren mit auf geometrischen Mehrgitterverfahren basierenden Lösern unter Ausnutzung aller an einem Rechenknoten verfügbaren Ressourcen.

Adaptivität Im Bereich der Gitteradaptivität kommt zusätzlich zur h-Adaptivität auch r-Adaptivität (Gitterdeformation) zum Einsatz. Diese Technik hat den Vorteil, die Struktur des zugrundeliegenden Gitters im Gegensatz zu bspw. h-Adaptivität nicht zu verändern, was insbesondere im FEAST-Kontext gute Ausnutzung der Rechenleistung mit der Fehlerreduktion adaptiver Gitter kombiniert. Die theoretisch bereits bestens untersuchten Techniken wurden mittels MPI parallelisiert und stehen somit nun allen Applikationen, die auf FEAST aufsetzen, zumindest prototypisch zur Verfügung.

HORNET – Subsystem für numerische Lineare Algebra Das FEAST-Subsystem für numerische Lineare Algebra wurde vollständig neu konzipiert. Hintergrund dieser Maßnahme ist die stetig anwachsende Komplexität von paralleler HPC-Software, was eine Fortführung der Vorgängercodes mit für wissenschaftliches Rechnen tradierten Programmiersprachen wie FORTRAN und C inpraktikabel macht. Der Einsatz von *Template Metaprogramming-Techniken*, insbesondere *Expression Templates* (ET), die in der jüngeren Vergangenheit immer mehr Anklang bei modernen Softwareprojekten des wissenschaftlichen Rechnens gefunden haben, sind zentraler Ausgangspunkt für die Neuimplementierung. Die Synthese aus der Hardware-orientierten Entwicklung performancekritischer Komponenten mit ETs erfolgt unter dem Arbeitstitel *Hardware-Oriented Numerics with Expression Templates* (HORNET).

Fortführung der Entwicklung von GPU-beschleunigten geometrischen Mehrgittermethoden für unstrukturierte Probleme Nach einer Erweiterung auf das ELLPACK-R Format zur Speicherung dünn besetzter Matrizen entspricht die Implementierung des SpMV-Kernels (*sparse matrix vector multiplication*) nun dem nach Expertensicht schnellsten publizierten Status. Durch eine Modifikation der Assemblierungsphase werden nicht nur Systemmatrizen in diesem Format gespeichert, sondern auch alle Transferoperatoren zwischen Gittern verschiedener Auflösung innerhalb einer geometrischen Mehrgitterhierarchie. Diese Vorgehensweise ist unabhängig von der Dimension und vom zugrundeliegenden Finite-Elemente-Raum. Insbesondere steht so eine allgemeine Möglichkeit zur Verfügung, konforme und nichtkonforme FEM-Diskretisierungen niedriger und hoher Ordnung in einer allgemeinen Implementierung hocheffizient zu unterstützen.

Es zeigte sich, dass die verwendete Datenstruktur gleichermaßen gut für die Parallelisierung auf moderne Mehrkern-Prozessoren geeignet ist, als auch für GPUs. Je nach gewähltem Nummerierungsverfahren der Freiheitsgrade und damit je nach Besetzungsmuster der Systemmatrizen variiert die Laufzeit stark. Dies wurde architekturunabhängig beobachtet. Aktuelle Untersuchungen zielen daher darauf ab, optimale Nummerierungsstrategien für verschiedene Probleme und Diskretisierungstechniken zu bestimmen. Es wird deutlich, dass alleine durch den Einsatz alternativer Nummerierungstechniken eine Größenordnung in der Leistung gewonnen werden kann. Der Einsatz von Multithreading liefert dann einen weiteren deutlichen Leistungsgewinn und schließlich kann man durch die GPU eine weitere Größenordnung gewinnen.

2.4 WP4: Hardwarenahe Implementierung auf Nicht-Standardprozessoren

Das Esoteric-Twist-Verfahren wurde in der abgelaufenen Berichtsperiode für das D3Q19-MRT-Modell zusammen mit einem Gitterverfeinerungsansatz vom iRMB für GPUs implementiert. Esoteric Twist erlaubt erstmalig, auf GPUs das Lattice-Boltzmann-Verfahren mit einem Satz an Verteilungsfunktionen zu realisieren. Bisher waren stets zwei Datensätze erforderlich. Da diese beiden Datensätze den Hauptteil des GPGPU-Speichers eingenommen haben, ist fast eine Halbierung des benötigten Speichers erreicht worden. Anders formuliert, können nun doppelt so große Gebiete pro GPGPU bearbeitet werden.

Die GPU-Implementierung in waLBerla wurde um allgemeine, auf der GPU berechnete Randbedingungen erweitert. Dies führt zu deutlich verbesserten Performance-Ergebnisse im Vergleich zu den bisher publizierten Werten. Das Framework wurde ebenfalls für partikelbeladene Strömungen auf GPU-Clustern erweitert und kann auf heterogenen CPU/GPU-Systemen eingesetzt werden.

2.5 WP5: Industriekontakte und Definition von Showcases

BASF-Showcase Der BASF-Showcase stellt ein industrierelevantes Rechenbeispiel mit einer komplexen Geometrie dar. Für diesen Showcase konnten Berechnungen der Hydrodynamik mit mehreren LB-Codes in einem großen Geschwindigkeitsbereich durchgeführt werden. Dabei kamen sowohl normale HPC-Cluster als auch GPU-Systeme zum Einsatz. Zusätzlich stehen zum Vergleich auch Berechnungen mit dem FEM-Löser FeatFlow zur Verfügung.

Definition weiterer Benchmarks In der vergangenen Berichtsperiode wurde von IANUS in Kooperation mit der Gruppe TU-DO der “Flow around a Cylinder in 3D” Benchmark definiert und mit einem FEM-Löser höherer Ordnung (Q2P1-Variante von FeatFlow) gerechnet. Die Ergebnisse wurden mit dem kommerziellen Solver CFX sowie dem Open-Source Paket OpenFoam verglichen. Es stehen damit Ergebnisse zur Verfügung, die als

Referenzlösung angesehen werden können und im dritten Projektjahr für grundlegende Vergleichsstudien der in SKALB weiterentwickelten Lattice-Boltzmann-Löser dienen sollen.

Als weiterer Testfall wurde die instationäre Tropfenabschnürung ausgewählt. Hierfür liegen neben sehr genauen numerischen Ergebnissen auch experimentelle Daten vor. IANUS wird Details dieses Benchmarks noch definieren.

2.6 Zusammenfassung des Projektfortschritts

Das Projekt liegt bei den wesentlichen Arbeitspaketen innerhalb des Projektplans.

Die Arbeiten im Bereich des AP4.a (GPUs) wurden im Vergleich zum Antrag weiterhin verstärkt. Dies liegt zunächst an den in den vorangegangenen Zwischenberichten genannten (zu Projektbeginn nicht absehbaren) technologischen Veränderungen (Abkündigung IBM-Cell-Prozessor und NEC-Vektorrechner), wodurch entsprechende Ressourcen in AP1.d und AP4.b freigesetzt wurden. Verstärkt wird dies durch den bisher sehr erfolgreichen Verlauf der Arbeiten in AP4.a. Bei der effizienten parallelen Nutzung von GPU-Clustern für LBM-basierte Strömungslöser sind die Partner international führend und sehr sichtbar.

Für den im Februar von BASF vorgestellten Showcase wurden von allen Partnern Rechnungen durchgeführt. Der quantitative Vergleich von Ergebnissen erfordert jedoch noch eine Präzisierung der zu untersuchenden Parameter (z.B. Einstromprofil, Sponge-Layer am Ausstrom).

3 Stand des Vorhabens, Erreichbarkeit der Ziele und Zielsetzung

Gegenüber dem Antrag haben sich hinsichtlich der Ziele und Zielsetzung keine nennenswerten Veränderungen ergeben.

Einzig auf die bereits früher genannte Verschiebung der Ressourcen, weg von der Optimierung für Vektorrechner und IBM-Cell-Systeme, hin zur Programmierung und Nutzung (hoch) paralleler GPU-Cluster, sei an dieser Stelle nochmals hingewiesen.

Im abgelaufenen Berichtszeitraum wurde von den meisten Partnern wieder auf internationalen Konferenzen über Ergebnisse aus dem Projekt vorgetragen. Eine Auswahl von Publikationen und Vorträge für den Berichtszeitraum ist dem Anhang beigefügt und vollständig auch auf der Webseite www.skalb.de verfügbar.

Die Firma IANUS betreut und koordiniert unverändert die Arbeiten für den industriellen Showcase des assoziierten Partners BASF. Der von der Firma Sulzer vorgeschlagene Testfall "Strömung in einer Trennkolonne" wird nicht mehr weiter verfolgt, da die meisten Projektpartner diesen Anwendungsfall nicht befriedigend lösen könnten und eine physikalische Modellentwicklung für Mehrphasenströmungen nicht Gegenstand von SKALB ist.

4 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die bisherigen Arbeiten der Projekts sind auf großes Interesse gestoßen, was sich in der Vielzahl von (eingeladenen) Vorträgen zeigt. Hervorzuheben sind insbesondere auch die Beiträge [T5] und [T4] auf der SuperComputing Konferenz 2010 (New Orleans).

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten Im Rahmen der nun abgelaufenen 24 Monate konnten an allen in SKALB eingebrachten LBM-Codes erhebliche Verbesserungen erzielt werden. Hinsichtlich Funktionsumfang und Stabilität konnte für die adressierten Einsatzgebiete die Qualität deutlich gesteigert werden. Performance und Skalierbarkeit liegt deutlich über den Kenngrößen kommerzieller Codes. Die Kommerzialisierung einzelner durch SKALB geförderter Entwicklungen wird derzeit sowohl in Braunschweig als auch in Erlangen untersucht.

Für IANUS steigen die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten mit zunehmender Projektlaufzeit.

Wissenschaftliche oder technische Erfolgsaussichten In diesem Bereich sind alle an SKALB beteiligten Gruppen mit ihren Codes nun international führend aufgestellt, was durch die zahlreichen Publikationen und eingeladenen Vorträge bei internationalen Konferenzen gezeigt wird. Die Simulationsprogramme werden für eine Vielzahl von unterschiedlichen Forschungsprojekte eingesetzt und haben sich zu wichtigen Werkzeugen entwickelt.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit Die Lattice-Boltzmann-Codes der einzelnen Gruppen sind auch im internationalen Vergleich sehr leistungsfähig und nahe am bzw. teilweise sogar über dem Niveau vergleichbarer (kommerzieller) Tools und werden täglich an beiden Gruppen eingesetzt. Neben bereits bestehenden nationalen und internationalen Kooperationen kommen vermehrt neue in- und ausländische Forscher auf einzelne Gruppenmitglieder zu, um von den gewonnenen Erfahrungen zu profitieren. Unterschiedliche Forschungsprojekte sind in der Vorbereitung, die eine wissenschaftliche aber auch finanzielle Fortsetzung der Aktivitäten über die Projektlaufzeit von SKALB sicherstellen sollen.

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit Die in SKALB erarbeiteten Methoden und verbesserten Programmimplementierungen sind eine Grundlage für die weitere Drittmitteleinwerbung der Antragsteller auf nationaler und internationaler Ebene geworden. Unterschiedliche Vorbereitungen für mögliche Forschungsprojekte sind bereits angelaufen.

Als Basis für eine wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist für IANUS zudem wichtig, den direkten Kontakt zu Industriekunden weiter auszubauen.

Anhang: ausgewählte Veröffentlichungen & Vorträge

Veröffentlichungen

- [P1] S. DONATH, K. MECKE, S. RABHA, V. BUWA UND U. RÜDE. Verification of surface tension in the parallel free surface lattice Boltzmann method in waLBerla. *Computers & Fluids*, To be published. Accepted for publication: December 23, 2010 (2010).
- [P2] D. GÖDDEKE UND R. STRZODKA. Mixed precision GPU-multigrid solvers with strong smoothers. In J. KURZAK, D. A. BADER UND J. J. DONGARRA (Hrsg.), „Scientific Computing with Multicore and Accelerators“, S. Kap. 7. CRC Press (2010).
- [P3] J. GÖTZ, K. I. M. STÜRMER UND U. RÜDE. Direct numerical simulation of particulate flows on 294912 processor cores. In „IEEE computer society: 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (Supercomputing 2010, New Orleans)“ (2010).
- [P4] T. HÜBNER. „A Monolithic, Off-Lattice Approach to the Discrete Boltzmann Equation with Fast and Accurate Numerical Methods“. Dissertation, Fakultät für Mathematik, TU-Dortmund (2010).
- [P5] T. KRAUSE. Entwicklung von Algorithmen zur automatisierten Leveldefinition speziell definierter Gitter. Studienarbeit, iRMB, TU-Braunschweig (2010).
- [P6] S. TUREK, D. GÖDDEKE, C. BECKER, S. H. BUIJSSEN UND H. WÖBKER. FEAST — Realisation of hardware-oriented numerics for HPC simulations with Finite Elements. *Concurrency and Computation: Practice and Experience* **22**(6), 2247–2265 (2010).
- [P7] S. TUREK, D. GÖDDEKE, S. H. BUIJSSEN UND H. WÖBKER. Hardware-oriented multigrid Finite Element solvers on GPU-accelerated clusters. In J. KURZAK, D. A. BADER UND J. J. DONGARRA (Hrsg.), „Scientific Computing with Multicore and Accelerators“, S. Kap. 6. CRC Press (2010).

Vorträge

- [T1] S. DONATH. A contact angle model for the parallel free surface lattice Boltzmann method in waLBerla. International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science 2010, Edmonton, Canada (July 2010).
- [T2] M. GEIER, M. SCHÖNHERR, M. STIEBLER UND M. KRAFCZYK. Compact second-order accurate momentum interpolation for the lattice Boltzmann method in three dimensions. International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science 2010, Edmonton, Canada (Juli 2010).

- [T3] J. HABICH. Optimizations on highly parallel on-chip architectures: GPUs vs. multi-core CPUs (for stencil codes). Eingeladener Seminar-Vortrag, iRMB, TU-Braunschweig (July 2010).
- [T4] J. HABICH, C. FEICHTINGER, G. HAGER UND G. WELLEIN. Poster: Parallelizing lattice Boltzmann simulations on heterogeneous GPU and CPU clusters. 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, New Orleans, Louisiana, USA (November 2010).
- [T5] K. IGLBERGER. Direct numerical simulation of particulate flows on 294912 processor cores. 2010 ACM/IEEE International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, New Orleans, Louisiana, USA (November 2010).
- [T6] K. IGLBERGER. Direct numerical simulation of particulate flows on 294912 processor cores. International Workshop on Multiscale Modeling, Simulation and Optimization, Cluster of Excellence Engineering of Advanced Materials, Erlangen (Oktober 2010).
- [T7] M. KRAFCZYK. Gitter-Boltzmann-Methoden für gekoppelte Strömungsprobleme. Eingeladener Vortrag bei der Siemens-AG in München (2010).
- [T8] M. KRAFCZYK. LB-methods for engineering CFD: potentials and problems. Workshop: Multiscale fluid dynamics with the Lattice Boltzmann method (2010).
- [T9] M. SCHÖNHERR, M. GEIER UND M. KRAFCZYK. Non-uniform LB simulations on GPUS. International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science 2010, Edmonton, Canada (Juli 2010).
- [T10] S. UPHOFF, M. GEIER, C. JANSSEN UND M. KRAFCZYK. Comparison of cascaded and MRT lattice Boltzmann models for low and medium Reynolds number flow. International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science 2010, Edmonton, Canada (Juli 2010).
- [T11] Y. WANG, M. KRAFCZYK UND B. AHRENHOLZ. Modeling evaporation mechanism with lattice Boltzmann multiphase models. International Conference for Mesoscopic Methods in Engineering and Science 2010, Edmonton, Canada (Juli 2010).
- [T12] G. WELLEIN UND F. PLATTE. Status report on BMBF project SKALB. BMBF-Workshop, Berlin (Dezember 2010).
- [T13] M. WITTMANN UND T. ZEISER. Parttitioning for lattice Boltzmann solver. LBM Day, ICAMMS, Ruhr-Universität Bochum (Dezember 2010).
- [T14] T. ZEISER. HPC for LBM – Activities at RRZE and within the BMBF project SKALB. LBM Day, ICAMMS, Ruhr-Universität Bochum (Dezember 2010).