

# forschen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Computational Engineering

Hochleistungsrechnen –  
die Schlüsseltechnologie

► Seite 6

Simulationen –  
Verbrennung verstehen

► Seite 36

Blitze im Computer –  
Schutz vor Gefährdungen

► Seite 42

► [www.tu-darmstadt.de](http://www.tu-darmstadt.de)

J 57936 T • ISSN 1868-9035

# Wovon Sie früher auch träumten: Jetzt ist die Zeit, es wahr zu machen.

Sie wollten schon immer an wegweisenden Projekten mitwirken? Bei uns können Sie das. Vom ersten Tag an. Einer guten Idee ist es schließlich egal, wer sie hat: der Junior oder der Abteilungsleiter. Und gute Ideen – die brauchen wir. Sie haben uns zu dem gemacht, was wir sind: einer der wichtigsten technologischen Schrittmacher. Im Mobilfunk. Im Digital-Fernsehen. In der Funktechnik. Auch bei Flugsicherung, drahtloser Automobiltechnik oder EMV sind wir federführend – und praktisch in allen unseren Geschäftsgebieten einer der drei Top-Player am Weltmarkt. Damit wir das auch bleiben, brauchen wir Sie. Als frischgebackenen Hochschulabsolventen, Praktikanten, Werkstudenten (m/w) oder fertigen Sie Ihre Abschlussarbeit (Bachelor, Master, Diplom) bei uns an. Wir freuen uns auf Sie!

[www.career.rohde-schwarz.com](http://www.career.rohde-schwarz.com)

## Liebe Leserinnen und Leser,

Methoden des Computational Engineering (CE) haben sich in den letzten Jahren zu einer Schlüsseltechnologie in allen Ingenieurbereichen entwickelt. Basierend auf computergestützter Modellierung, Analysis, Simulation und Optimierung bieten sich attraktive kostengünstige Möglichkeiten, immer komplexer werdende Anwendungen zu untersuchen und neue technische Lösungen zu entwickeln. Dies liefert einen wichtigen Beitrag, um optimale Strategien für zentrale Fragen der technischen Entwicklung in Wirtschaft und Gesellschaft zu finden, wie etwa in den Gebieten Energie, Gesundheit, Sicherheit und Mobilität. Durch die im Rahmen der Exzellenzinitiative eingerichtete Graduiertenschule Computational Engineering konnte die TU Darmstadt ihre Rolle im Bereich CE weiter stärken. Zusammen mit dem Forschungsschwerpunkt CE und den Bachelor- und Master-Studiengängen CE bietet sich ein hervorragendes Umfeld, um das Gebiet entscheidend voran zu bringen. Eine wesentliche Voraussetzung ist hierbei auch die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen Hochleistungsrechner-Infrastruktur. Mit dem ab 2012 beginnenden deutlichen Ausbau der entsprechenden Kapazitäten und Kompetenzen kann hinsichtlich der Komplexität der Anwendungen und der Qualität der Vorhersagegüte in neue Dimensionen vorgestoßen werden. Die Beiträge in der vorliegenden Ausgabe sollen das hohe Potential des kombinierten Einsatzes moderner Methoden des CE und des Hochleistungsrechnens aufzeigen sowie Ansatzpunkte für entsprechende Kooperationsmöglichkeiten liefern. Die Autoren freuen sich über eine Kontaktaufnahme.

**Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer**  
Leiter des Instituts für Numerische  
Berechnungsverfahren im Maschinenbau  
und Dekan der Graduiertenschule  
Computational Engineering



*Dear Readers,*

*Methods of Computational Engineering (CE) have become a key technology in all fields of engineering sciences during the last years. Computer based modeling, analysis, simulation, and optimization offer attractive cost-efficient ways to investigate increasingly complex engineering applications and to develop new technical solutions. This vitally contributes to the discovery of optimal strategies addressing key issues of technical developments in economy and society in areas such as energy, health, safety, and mobility.*

*With the establishment of the Graduate School of Computational Engineering, founded within the scope of the Excellence Initiative, the TU Darmstadt was able to further strengthen its role in the field of CE. Together with the Research Focus CE and the BSc/MSc study programs in CE, an excellent environment is*

*formed to essentially increase the scientific progress in the field. A fundamental requirement in this context is the availability of a powerful high-performance computing infrastructure. The significant extension of the corresponding capacities and competencies starting in 2012, will allow to enter new dimensions regarding the complexity of engineering applications and the quality of prediction accuracy.*

*The articles in this issue aim at illustrating the large potential of a combined employment of modern methods of CE and high-performance computing techniques as well as depicting opportunities for cooperation. The authors look forward to establishing new contacts.*

**Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer**  
Head of Institute of Numerical Methods  
in Mechanical Engineering and  
Dean of the Graduate School  
of Computational Engineering

**Es geht darum,  
optimale Strategien  
für zentrale Fragen  
der technischen  
Entwicklung zu  
finden.**

## Effizientes Hochleistungsrechnen

- 6** ► Das Hochleistungsrechnen erlaubt die Simulation von Vorgängen aus Natur und Technik von hoher Komplexität und ist deshalb für eine technische Universität eine Schlüsseltechnologie.

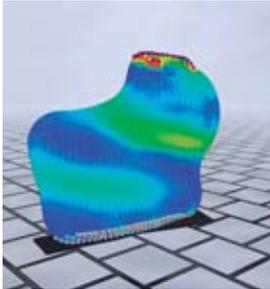
Von Christian Bischof, Norbert Conrad



## Massiv-paralleles Rechnen im Computational Engineering

- 10** ► Many-Core Hardwarearchitekturen ermöglichen durch ihre enorme Rechenleistung interaktive Simulationen, erfordern aber eine geeignete Zerlegung der Berechnung in parallelisierbare Teilprobleme.

Von Michael Goesele, Dieter W. Fellner, André Stork, Daniel Weber, Sven Widmer, Dominik Wodniok



## Effizienz durch adaptive Simulationsverfahren

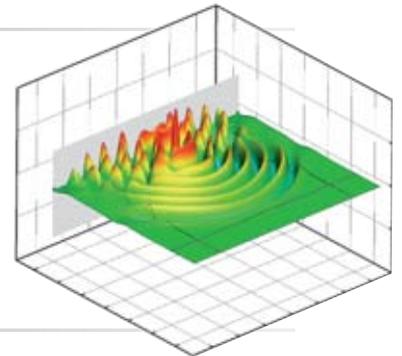
- 16** ► Computersimulationen haben den Entwicklungsprozess revolutioniert. Nun steigern adaptive Verfahren deren Effizienz und verkürzen damit drastisch Simulationszeiten.

Von Jens Lang, Martin Lilienthal, Sascha Schnepf

## Multiphysik – neue Einsichten durch gekoppelte Simulation

- 22** ► Die numerische Simulation gekoppelter Problemstellungen auf Hochleistungsrechnern ist ein Forschungsschwerpunkt am Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau.

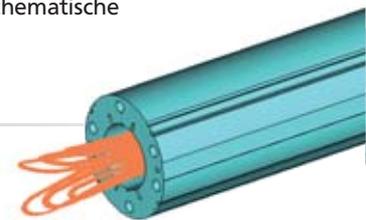
Von Dörte C. Sternel, Michael Schäfer



## Optimierte Grenzschichtbeeinflussung durch Plasma-Aktuatoren

- 26** ► Ein Forschungsprojekt der Graduiertenschule CE beschäftigt sich mit der gezielten Strömungsbeeinflussung durch Plasma-Aktuatoren, deren Betriebsparameter durch mathematische Optimierungsverfahren gesteuert werden.

Von Jane Ghiglieri, Sven Grundmann, Cameron Tropea, Stefan Ulbrich



## Direkte Numerische Simulation der Turbulenz

- 32** ► Turbulenz gilt als eines der sieben Millennium-Probleme der Mathematik. Die direkte numerische Simulation ist die genaueste Methode zur Berechnung turbulenter Strömungen, erfordert aber einen extrem hohen Rechenaufwand.

Von Martin Oberlack, George Khujadze, Victor Avsarkisov, Yongqi Wang

---

## Simulation technischer Verbrennungsprozesse

- 36** ▶ Bei der Energiewandlung in Verbrennungssystemen verlangen wir mehr Effizienz und einen geringeren Schadstoffausstoß. Moderne Simulationen geben detaillierte Einblicke in Verbrennungsprozesse.

Von Michael Baumann, Mouldi Chrigui, Benjamin Böhm, Johannes Janicka

---



## Blitze im Computer

- 42** ▶ Was passiert im menschlichen Körper bei einem Blitzschlag? Ausgefeilte Algorithmen und moderne Rechentechnologien bringen Licht in eine Fragestellung, die durch Messung nicht geklärt werden kann.

Von Jing Gao, Stephan Koch, Irina Munteanu, Thomas Weiland

---

## Phasenfeldsimulationen ferroelektrischer Werkstoffe

- 48** ▶ Von elektrischen Feuerzeugen bis nichtflüchtigem FeRAM, die Einsatzpalette von Ferroelektrika ist weitgefächert und erweitert sich stetig. Eine Voraussetzung dafür sind Fortschritte in den theoretischen Materialmodellen.

Von Daniel J. Franzbach, Kyle G. Webber, Jürgen Rödel

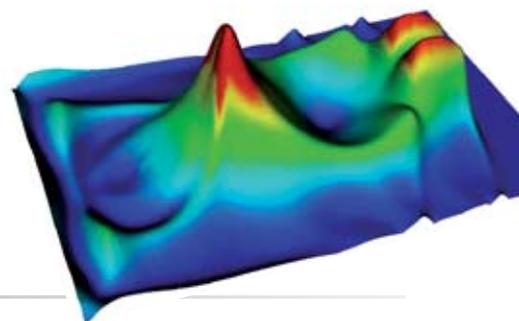
---

## Kompakte Teilchenbeschleuniger der Zukunft

- 52** ▶ Die Plasmawakefeldbeschleunigung verspricht für die Zukunft kompakte Teilchenbeschleuniger mit der gleichen Leistung wie Großbeschleunigeranlagen der Gegenwart.

Von Erion Gjonaj, Thomas Weiland

---

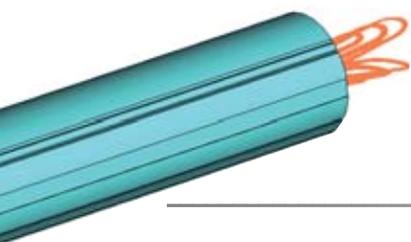


## Bessere Magnete durch Simulation und numerische Optimierung

- 58** ▶ Neue Optimierungsmethoden ermöglichen das Auffinden besonders leistungsfähiger Designs auf Grundlage komplexer Simulationsberechnungen am Beispiel von Synchrotron-Magneten.

Von Thomas Hemker, Herbert De Gersem, Stephan Koch, Oskar von Stryk

---



## Herausforderungen zukünftiger Mobilkommunikation

- 64** ▶ Zukünftige drahtlose Kommunikationssysteme erfordern neuartige Lösungsansätze, um den steigenden Bedarf an Datenraten zu decken. Im Rahmen von CE werden diese entwickelt und untersucht.

Von Anja Klein, Abdelhak Zoubir, Stefan Ulbrich, Holger Degenhardt, Fiky Y. Suratman, Alexander Kühne

---

# Effizientes Hochleistungsrechnen

Das Hochleistungsrechnen erlaubt die Simulation von Vorgängen aus Natur und Technik von hoher Komplexität und ist deshalb für eine technische Universität eine Schlüsseltechnologie. Die Rechner werden immer leistungsfähiger, aber ihre Nutzung auch anspruchsvoller. Eine effiziente Nutzung erfordert insbesondere eine Programmierung, welche die Fähigkeiten der Maschine ausnutzt, und eine Software-Architektur, welche die Anpassung und Erweiterung der im Allgemeinen recht langlebigen Programme vor dem Hintergrund der sich sehr viel schneller ändernden Hardware-Landschaft realisiert.

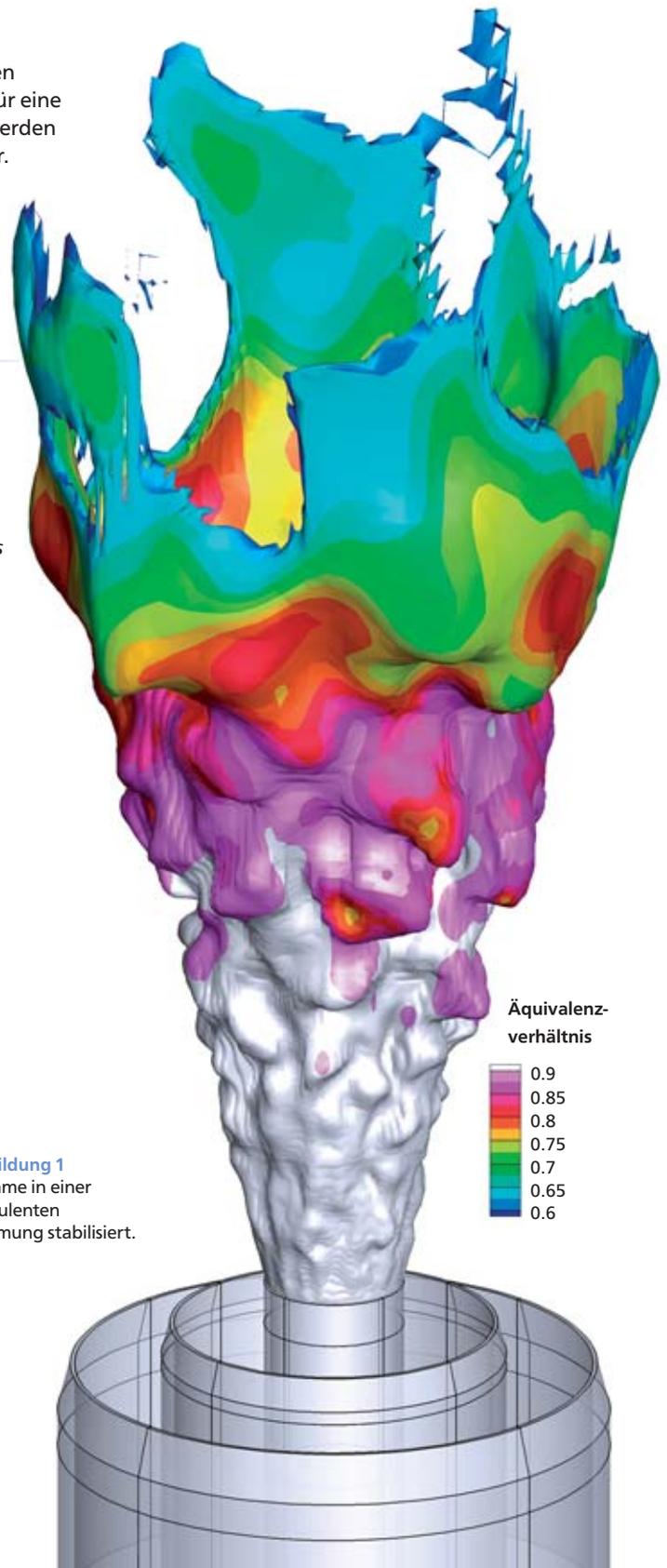
## ► Efficient High-performance Computing

*High-performance computing (HPC) enables the simulation of complicated technical and natural phenomena and is a key technology for a technical university. Computing power continues to increase, but so does the complexity of using high-performance computers. In particular, efficient use requires a programming style which exploits the machine's capabilities, and a software architecture which allows the adaptation and extension of the usually rather long-lived programs in light of a quickly changing hardware landscape.*

**Von Christian Bischof, Norbert Conrad** • Das Hochleistungsrechnen hat sich mittlerweile zu einer Schlüsseltechnologie in der simulationsbasierten Wissenschaft (im Englischen: Computational Engineering and Science, CES) entwickelt. Als Beispiel zeigt Bild 1 die Simulation einer Flamme, welche in einer turbulenten Strömung mit starken Konzentrationsgradienten stabilisiert ist. Diese Arbeiten erfordern die Auflösung sehr kleiner Skalen, wodurch solche Berechnungen sehr aufwändig werden (siehe [www.ekt.tu-darmstadt.de](http://www.ekt.tu-darmstadt.de)).

### Hochleistungsrechnen als Schlüsseltechnologie

Ein weiteres Beispiel ist das Redesign und optimierte Engineering von bakteriellen Atmungsketten und metabolischen Netzen. Diese erfordern die Modellierung über viele Längen- und Zeitskalen hinweg. Die Verbesserung des Stoffumsatzes solcher Netze ist Voraussetzung für ihre großtechnische Nutzung als mögliche biologische Energiewandler. Abbildung 2 illustriert ein wichtiges Enzym – eine Hydrogenase (links) – aus dem Bakterium *Wolinella succinogenes*



**Abbildung 1**  
Flamme in einer turbulenten Strömung stabilisiert.

und seine Einbettung in das biochemische Reaktionsnetzwerk (rechts) der Zelle. Alle Modellierungsschritte und die Schnittstellen zwischen den einzelnen Längenskalen sind auf Algorithmen und Architekturen des Hochleistungsrechnens angewiesen (siehe etwa [http://www.bio.tu-darmstadt.de/forschen/researchfoci\\_1/syntheticbiology.de.jsp](http://www.bio.tu-darmstadt.de/forschen/researchfoci_1/syntheticbiology.de.jsp)). Diese Beispiele sind repräsentativ für die Breite der Anwendungen, welche an der TU Darmstadt mittels des Hochleistungsrechnens und insbesondere unter Einsatz des Hessischen Hochleistungsrechners vorangetrieben werden.

### Die Entwicklung der Rechnerleistung

Die Fortschritte der Halbleiterindustrie haben dazu geführt, dass man für eine bestimmte Investitionssumme im Laufe der Zeit immer mehr Rechenleistung erhält. Das Moore'sche Gesetz besagt, dass sich alle 18 Monate die Transistordichte verdoppelt, dass man also für das gleiche Geld doppelt so viel Rechenleistung oder Speicherplatz erhalten kann. Das Moore'sche Gesetz gilt weiterhin, obwohl seit 2005 die Taktraten von Prozessoren, die sich bis dahin ähnlich dem Moore'schen Gesetz verhalten hatten, nicht mehr weiter steigen. Die Gesamtleistung der Systeme wird nun dadurch gesteigert, dass funktionale Einheiten repliziert werden. Beispiele hierfür sind die mittlerweile zum Standard gewordenen Mehrkernprozessoren, aber auch Akzeleratoren, insbesondere Grafikkarten, deren Vektor-

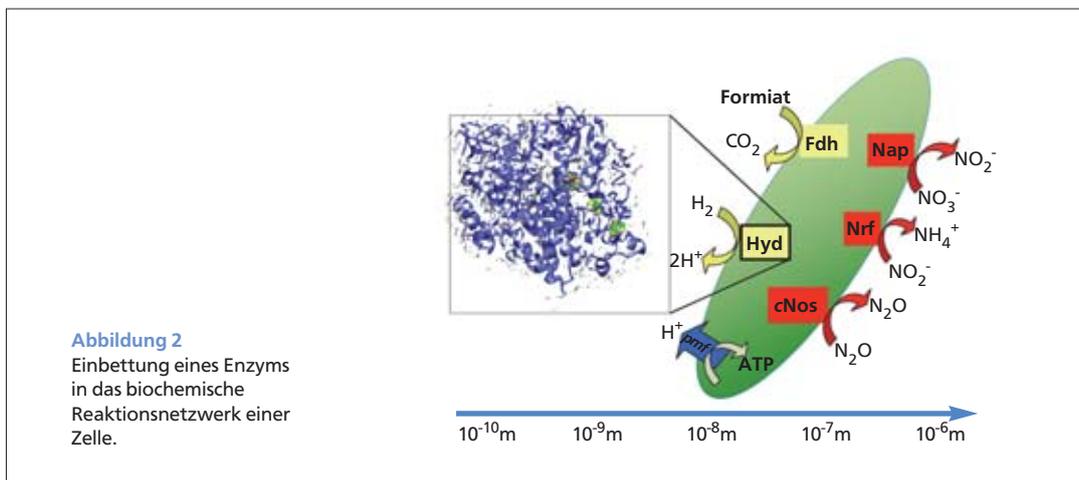
recheneinheiten für die Simulation verwendet werden können.

Der TOP500-Benchmark ([www.top500.org](http://www.top500.org)) misst die Rechenleistung der weltweit größten Computersysteme basierend auf der Lösung eines linearen Gleichungssystems  $A \cdot x = b$  mit dem klassischen Gauss-Algorithmus (der sog. Linpack-Benchmark). Bild 3 zeigt die rasante Steigerung der Rechenleistung über die Jahre. Hierbei zeigt die mit (N=1) markierte Linie die Leistung des schnellsten, die mit (N=500) die Leistung des 500. Systems, und die mit (SUM) markierte Linie die summierte Gesamtleistung aller 500 Rechner auf der Liste an. Die aktuelle TOP500-Liste (Juni 2011) führt ein in Japan installiertes System der Firma Fujitsu an, das mit 500.000 Rechenkernen eine Linpack-Rechenleistung von über 8 Petaflops erreicht (ein Petaflop oder PFlop sind  $10^{15}$  Gleitpunktoperationen pro Sekunde). Das schnellste deutsche System von der Firma IBM auf Platz 12 ist am Forschungszentrum

#### Hochschulrechenzentrum

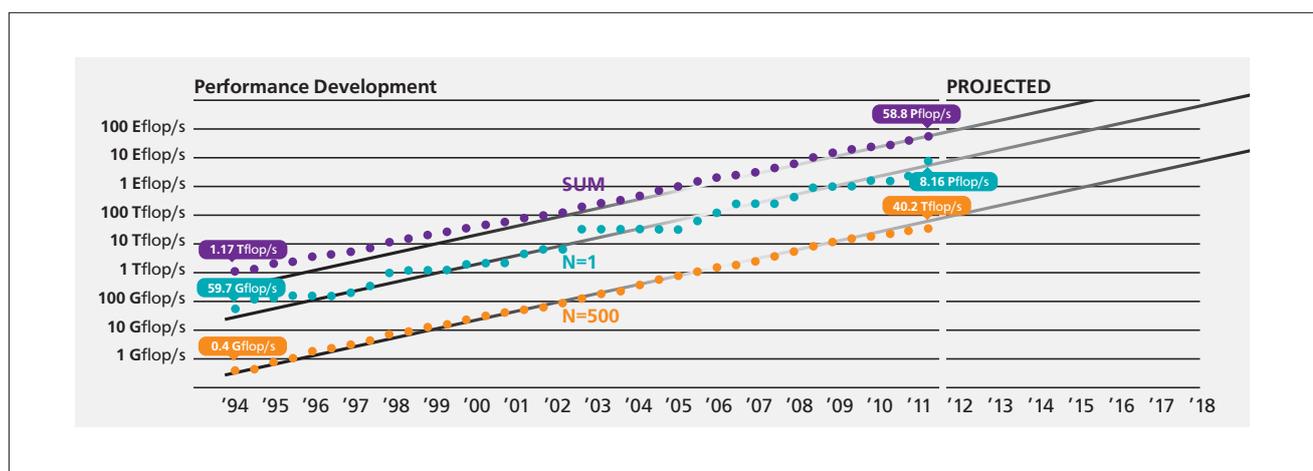
Prof. Dr. Christian Bischof  
Tel. 06151/16-3157  
E-Mail: [christian.bischof@tu-darmstadt.de](mailto:christian.bischof@tu-darmstadt.de)

Dr. Norbert Conrad  
Tel. 06151/16-5614  
E-Mail: [conrad@hrz.tu-darmstadt.de](mailto:conrad@hrz.tu-darmstadt.de)  
[www.hrz.tu-darmstadt.de](http://www.hrz.tu-darmstadt.de)



**Abbildung 2**

Einbettung eines Enzyms in das biochemische Reaktionsnetzwerk einer Zelle.



Jülich installiert, und liefert mit 250.000 Rechenkernen 0,8 Petaflops. Das letzte System in der aktuellen Liste liefert noch über 40 Teraflops ( $10^{12}$  Gleitpunktoperationen pro Sekunde), und damit mehr als die Nummer 1 von vor 10 Jahren. Der TOP500-Benchmark ist spannend und zeigt die Möglichkeiten der Computer-Technologie, er hat aber wenig Aussagekraft für die meisten realen Fragestellungen. Gerade bei algorithmisch komplexen Problemen in den Ingenieurwissenschaften wird nur eine sehr viel kleinere Rechenleistung als im Benchmark erreicht.

### Die effiziente Nutzung von Hochleistungsrechnern

Leistung hat ihren Preis: Eine Studie (Referenz 1) der RWTH Aachen zeigt, dass eine reine Hardware-Investition von 2 Mio EUR Gesamtkosten in Höhe von 5,5 Mio EUR impliziert. Die Kostenaufteilung ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Anteil der Hardware beträgt nur ca. 36 %, Stromkosten 28 % und Betriebspersonal sowie Wartung sind in der Größenordnung von jeweils 13–14 %. Diese Zahlen belegen, dass es wenig Sinn macht, am Betriebspersonal zu sparen, denn nur wenn Hochleistungsrechnen als Dienstleistung betrachtet wird („HPC as a Service“) wird die Investition vor dem Hintergrund der hohen Fixkosten sinnvoll genutzt.

Diese Gesamtkostenberechnung (engl.: TCO = total cost of ownership) betrachtet aber nicht die reale

**Abbildung 3**  
Die Entwicklung der Rechnerleistung in der TOP500 Benchmark.

Leistung, die Programme auf der Maschine erreichen. Ein Programm, das 5 % des Jahresrechenkontingentes verbraucht, aber nur 2 % der Spitzenleistung des Rechners realisiert, kostet unter reinen TCO-Gesichtspunkten betrachtet genau so viel wie ein Programm, welches gleich lang läuft, aber 10 % der Spitzenleistung nutzen kann.

Eine Studie der US-Regierung (Referenz 2) fand heraus, dass die Lebensdauer von Ingenieurcodes im Durchschnitt 17 Jahre beträgt, also mehr als drei Computergenerationen. Aus Sicht der mit der Entwicklung betrauten Wissenschaftler ist die Erstellung des ersten Code Artefakts schon eine große Leistung – für die Anpassung an neue Architekturen fehlt dann aber oft die Zeit oder das Know-How.



**Christian Bischof** ist seit Juli 2011 Professor im Fachbereich Informatik und Leiter des Hochschulrechenzentrums (HRZ) der TU Darmstadt.



**Norbert Conrad** leitet seit 2007 die Hochleistungsrechnergruppe des Hochschulrechenzentrums und ist seit 2009 stellvertretender Leiter des HRZ.

### Der Hessische Hochleistungsrechner

Seit 1991 ist die TU Darmstadt Standort des Hessischen Hochleistungsrechners HHLR. Dieser kann von Wissenschaftlern aller hessischen Hochschulen sowie des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung genutzt werden. Im Rahmen des Exzellenzclusters Smart Interfaces und der Graduiertenschule Computational Engineering hat die TU Darmstadt einen erfolgreichen Antrag für einen neuen Hochleistungsrechner sowie ein zugehöriges neues Gebäude gestellt, die Inbetriebnahme ist 2012 geplant.

Cost Category	Cost/Year	Percentage
Building (7.5 Mio/25y)	300.000 €	5.42 %
Investment compute servers	2.000.000 €	36.14 %
Hardware maintenance	800.000 €	14.46 %
Power	1.563.660 €	28.26 %
Linux	0 €	0.00 %
Batch system	100.000 €	1.81 %
ISV software	0 €	0.00 %
HPC software	50.000 €	0.90 %
Staff (12 FTE)	720.000 €	13.01 %
Total sum	5.533.660 €	100.00 %

**Abbildung 4**  
Die Gesamtkostenrechnung für den Betrieb eines universitären Hochleistungsrechners.

Deshalb wird in dem oben genannten Artikel neben Hardware und Software auch „Brainware“, also im Optimieren (tuning) von Programmen für Hochleistungsrechner kundige Personen, als drittes Standbein einer sinnvollen Hochleistungsrechnerinstallation postuliert. Basierend auf den realen Erfahrungswerten der RWTH Aachen kann man zeigen, dass drei Tuning-Experten, die bei den 30 Projekten, welche ca. 60 % der Rechenzeit verbrauchen, jeweils 20 % Laufzeiterparnis realisieren, so eine halbe Million EUR pro Jahr an Einsparungen erzielen. Gerade unter Nachhaltigkeitsaspekten ist es also sinnvoller, etwas weniger in Hardware zu investieren und stattdessen dafür zu sorgen, dass sie durch Einsatz von „brainware“ sinnvoll und effizient genutzt wird.

#### Softwareentwicklung für Hochleistungsrechner

Der schon erwähnte Artikel von Post et al. schildert auch den recht rudimentären Reifegrad der gängigen Softwareentwicklungsmethoden für Hochleistungsrechner. Die gängigen Programmierparadigmen (MPI für Maschinen mit verteiltem Speicher, OpenMP für Multicore-Prozessoren mit gemeinsamem Speicher und CUDA für Grafik Beschleuniger) befinden sich alle auf einem relativ maschinennahen Abstraktionsniveau. Das Entwickeln von Code für Hochleistungsrechner ist demnach eine intellektuelle Herausforderung, wobei Programmierproduktivität zur Erstellung von Software sowie Wartbarkeit und Verifizierbarkeit des resultierenden Codes noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Da aber die Rechenplattformen der Zukunft sehr viel stärker parallel sein werden, ist es unabdingbar, dass sich die Informatik in ihrem Kerngeschäft der Softwareentwicklung wieder mehr dem Thema Parallelität zuwendet. Notwendig sind Software-Architekturen, welche die Anpassung und Erweiterung der Programme vor dem Hintergrund der sich sehr viel schneller ändernden Hardware ermöglichen. Aufgrund der schon erwähnten Komplexität von Algorithmen und Hardware können hier tragfähige Lösungen nur in einer engen Zusammenarbeit von Informatikern und Anwendern erreicht werden, wie sie zum Beispiel in der Graduiertenschule Computational Engineering an der TU Darmstadt praktiziert wird. Durch diese interdisziplinäre Zusammenarbeit, und nur hierdurch, wird auch das langfristig größte Problem des Hochleistungsrechnens gelöst, nämlich die Ausbildung von Forschern, welche die Anforderungen des Hochleistungsrechners in der Modellierung, Numerik und Softwareentwicklung verstehen und im Team effiziente Lösungen realisieren können.

#### Literatur

C. Bischof, D. an Mey, C. Iwainsky, Brainware for Green HPC, in Proc. Int. Conf. on Energy-Aware High-Performance Computing 2011 (ENA-HPC2011), Th. Ludwig, Ed., erschienen in der Reihe Computer Science - Research and Development des Springer Verlag, 2011.

Post, D.E., Kendall, R.P.: Software project management and quality engineering practices for complex, coupled multiphysics, massively parallel computational simulations: Lessons learned from ASCI. Int. J. High Perform. Comput. Appl. 18, 399-416 (2004)

# Massiv-paralleles Rechnen im Computational Engineering

Many-Core Hardwarearchitekturen ermöglichen durch ihre enorme Rechenleistung interaktive Simulationen von Deformationen und Strömungen. Komplexe Berechnungen, die sonst mehrere Tage Rechenzeit in Anspruch nehmen, können in Sekundenbruchteilen erledigt werden. Interaktive Simulationen erlauben es dem Anwender, Prototypen schneller und effizienter zu entwickeln. Die notwendige Rechenleistung wird durch die massiv-parallele Ausführung von Berechnungen erreicht. Die geeignete Zerlegung einer Berechnung in parallelisierbare Teilprobleme stellt dabei die größte Herausforderung dar.

## ► *Massively Parallel Processing in Computational Engineering*

*Many-Core hardware architectures enable us to interactively simulate deformations and fluids. Complex calculations taking normally up to several days of computation time can be completed in less than a second. Interactive simulations allow engineers to rapidly prototype new components. The required computational power is achieved by the massively parallel execution of computations. Suitable partitioning of a problem into parallelizable subproblems poses hereby the biggest challenge.*

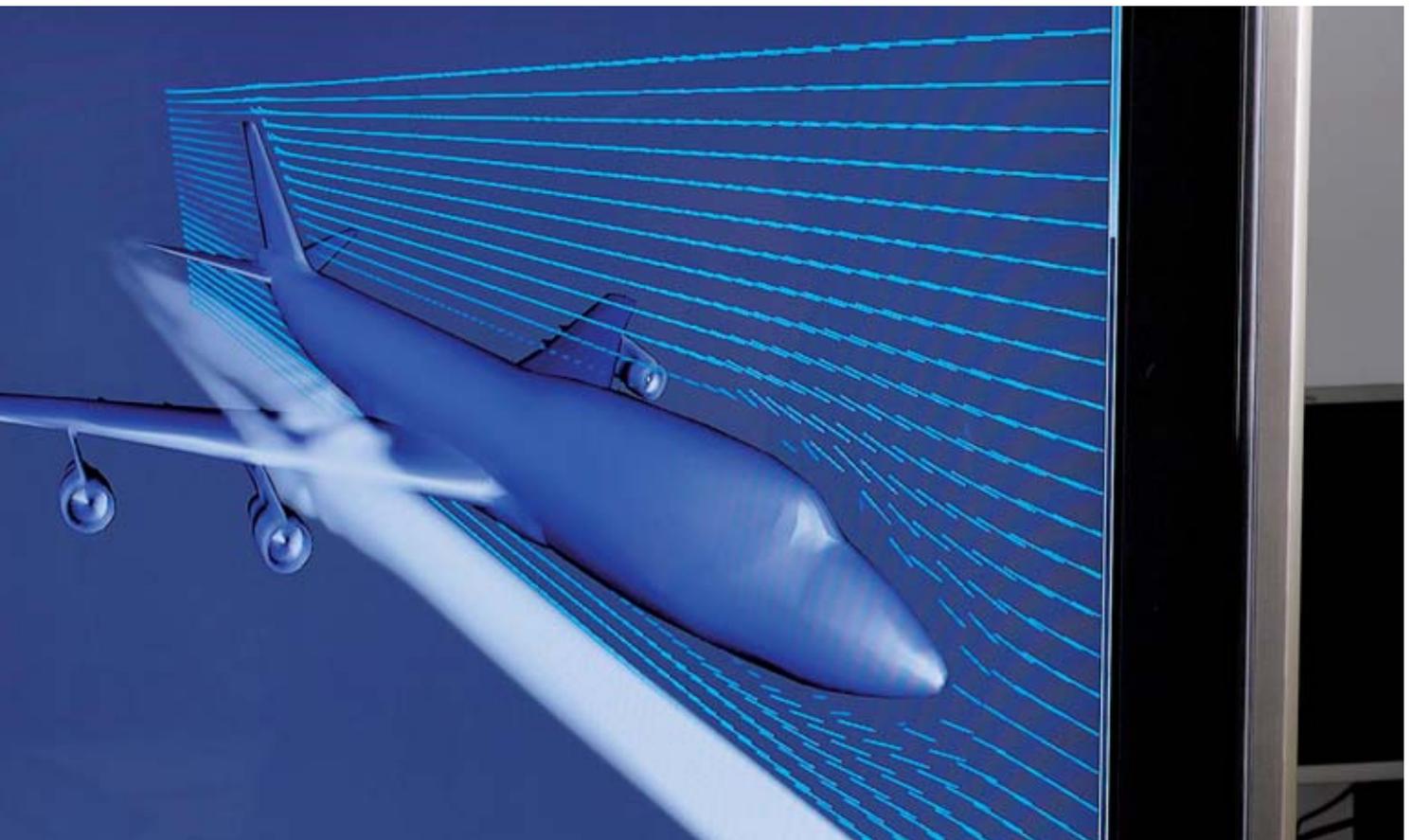


**Michael Gesele, Dieter W. Fellner, André Stork, Daniel Weber, Sven Widmer, Dominik Wodniok** • Simulationen und Analysen komplexer Modelle im Bereich des Computational Engineering benötigen mit zunehmender Komplexität auch mehr und mehr Rechenleistung. Mit wachsender Rechenleistung kann die Problemgröße gesteigert und können somit neue Erkenntnisse erschlossen werden. Seit Mitte der 90er Jahre ist es allgemeiner Konsens, dass eine signifikante Steigerung der Rechenleistung nicht mehr, wie durch Moore's Law vorhergesagt, durch eine reine Erhöhung der Taktfrequenzen und Verdopplung der Anzahl der Transistoren realisierbar ist. Aktuelle technische Entwicklungen erreichen daher einen Leistungsgewinn durch die Vervielfachung der Recheneinheiten

(Kerne, englisch: Cores) [Berkeley06]. Dies ermöglicht und erfordert eine effiziente Parallelisierung der Berechnungen durch Verteilung von Teilberechnungen auf die einzelnen Recheneinheiten. Beispiele für solche Multi-Core und Many-Core Systeme sind Graphikkarten, speziell zugeschnittene FPGAs und Intels MIC System.

### **Rechnen auf Graphikkarten**

Eine Berechnungseinheit, die Daten parallel verarbeitet und praktisch in jedem Workstationrechner verfügbar ist, ist die Graphikkarte. Mit der Einführung der programmierbaren Graphik-Pipeline vor rund zehn Jahren eröffnete sich die Möglichkeit, die Graphikkarte (Graphics Processing Unit, GPU) für allgemeine Berechnungen



unter Zuhilfenahme gängiger APIs wie DirectX bzw. OpenGL zu verwenden. Erste Anwendungen waren etwa schnelle Matrixoperationen sowie Gleichungslöser zum Lösen linearer Gleichungssysteme. Aufgrund der Komplexität und des hohen Entwicklungsaufwands fand Parallelisierung von Berechnungen auf GPUs außerhalb der Computergraphik jedoch kaum Verwendung.

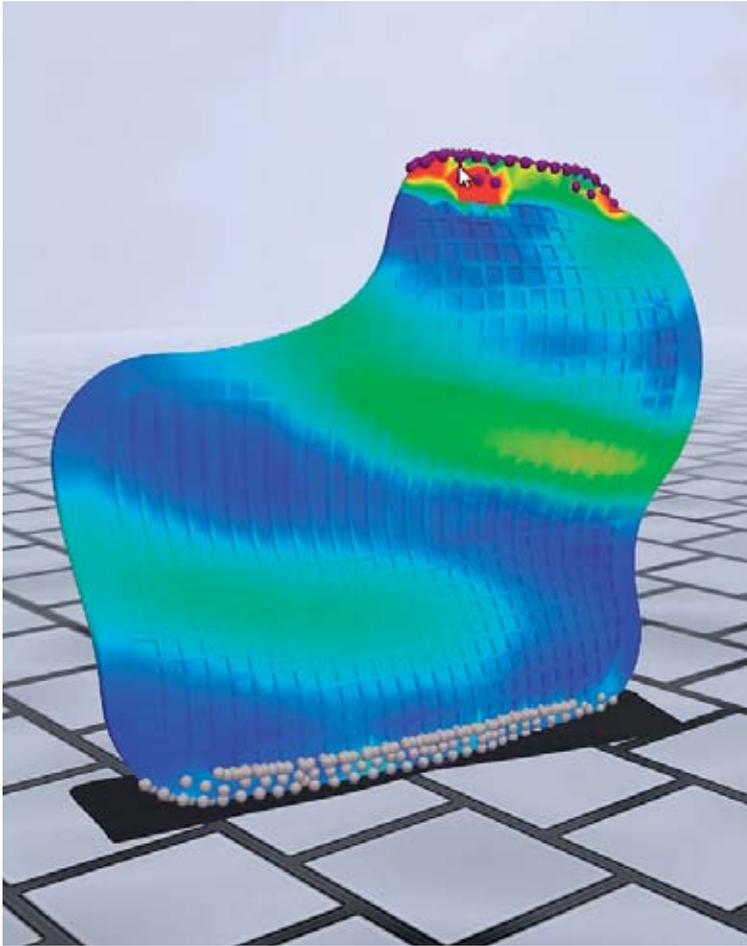
Im Zuge der weiteren Entwicklung wurden neue Schnittstellen und Hardwarearchitekturen definiert, die den Implementierungsaufwand paralleler Algorithmen enorm reduzieren. Gerade die Einstiegshürde für die Entwicklung solcher Systeme wurde durch C-artige Schnittstellen stark gesenkt. Die Portierung bestehender Programme wurde dadurch stark erleichtert und für Probleme außerhalb

Interaktive Strömungssimulation eines Flugzeugs in einem dreidimensionalen, virtuellen Windkanal. Zur Visualisierung des Strömungsfeldes kann der Benutzer eine Rauchquelle platzieren und daran das Verhalten des Flugzeuges im Luftstrom analysieren.

der Computergraphik zugänglicher [Wienke11]. Um eine optimale Leistung zu erzielen, sind jedoch Kenntnisse über die Eigenschaften und technischen Limitierungen von GPUs unbedingt erforderlich. So kann bei ungeschickter Implementierung der parallele Algorithmus eine längere Laufzeit aufweisen als eine entsprechende sequentielle Version. Im Laufe der Zeit haben sich drei unabhängige Schnittstellen zur Programmierung von Many-Core Systemen etabliert: NVIDIA's „C for CUDA“, Microsoft's DirectCompute API und der offene Standard OpenCL.

#### **Anwendungen interaktiver Simulationen**

Das Potential dieser enormen Rechenleistung auf Graphikhardware wird am Fraunhofer IGD für ver-



**Abbildung 1**

Deformationsimulation einer Fußmatte in Echtzeit. Die Einfärbung der Geometrie repräsentiert die inneren Kräfte von hoch (rot) bis niedrig (blau).

schiedene Anwendungen ausgenutzt. Beispiele hierfür sind Simulationen im Bereich Strömung und elastischer Deformationen. Mit solchen Simulationen lassen sich Produkte vor der eigentlichen

Herstellung oder der Erstellung eines Prototyps auf verschiedene Eigenschaften hin untersuchen und optimieren. Zwar verwenden einige kommerzielle Simulationspakete mittlerweile auch Graphikhardware um den Berechnungsprozess zu beschleunigen; solche Analysen dauern wegen der enormen Genauigkeitsansprüche im Allgemeinen jedoch immer noch Stunden, Tage oder sogar Wochen.

Die Modellierung von elastischen Materialien lässt sich für den Herstellungsprozess komplexer Produkte verwenden. Beim Zusammenstellen eines Autos müssen beispielsweise Hunderte elastische Komponenten verbaut werden (siehe das Beispiel einer Fußmatte in Abbildung 1). Im Motorraum ist es interessant, ob die Abmessungen und auch der verbleibende Raum ausreichen, um die Menge an Kabeln und Gummischläuchen montieren zu können, damit die Produzierbarkeit gewährleistet ist. Beim Anfertigen von Tür-Gummidichtungen kommt es auf die richtige Menge und die Art des



**Michael Goesele** ist seit 2007 Professor für Geometrische Modellierung und Animation an der TU Darmstadt.



**Dieter Fellner** ist seit 2006 Professor an der TU Darmstadt und Direktor des Fraunhofer IGD. Er ist außerdem Vorstand des Instituts für ComputerGraphik und WissensVisualisierung an der TU Graz.



**André Stork** ist Leiter der Abteilung für Industrielle Anwendungen am Fraunhofer IGD und Honorarprofessor an der TU Darmstadt.



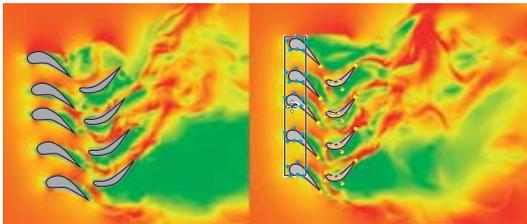
**Daniel Weber** ist seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Industrielle Anwendungen am Fraunhofer IGD. Er forscht an physikalisch basierten Echtzeit-Simulationen.



**Sven Widmer** ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich des high performance computing und physikalisch korrekter Bildsynthese mittels massiv-paralleler Methoden.



**Dominik Wodniok** ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am GRIS TU Darmstadt. Er interessiert sich für die physikalisch korrekter Bildsynthese mittels massiv-paralleler Methoden.

**Abbildung 2**

Eine interaktive Strömungssimulation ermöglicht die direkte Manipulation von Geometrie mit der unmittelbaren Analyse der Auswirkungen. Hier wird die Durchströmung von Turbinenschaufeln durch einen niedrigeren Anstellwinkel verändert, um beispielsweise die Kräfte zu minimieren.

Materials an, so dass die Tür luft- und schallisoliert schließt. Wird zu viel Material verwendet, lässt sich unter Umständen die Tür nicht mehr schließen. Am Fraunhofer IGD werden dafür spezielle Algorithmen mit Fokus auf einer schnellen Simulation entwickelt. Die Berechnung einzelner Zeitschritte soll dabei in Bruchteilen von Sekunden ablaufen. Das ermöglicht ein Eingreifen in die laufende Simulation, um lokal Änderungen durchzuführen und die Auswirkungen dieser Änderungen direkt zu beobachten. Hierbei liegt der Fokus nicht auf ultimativer Genauigkeit des simulierten Ergebnisses, wie es für präzise Analysen mit bereits existierenden Simulationspaketen benötigt wird. Vielmehr sollen frühzeitig Trends und Tendenzen bei variierenden Materialparametern und Geometrie erkannt werden. Ein Ingenieur kann in einer solchen frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses dann deutlich mehr Konfigurationen ausprobieren und somit beispielsweise schneller zur optimalen Geometrie der Türgummidichtung gelangen.

Eine weitere Anwendung ist eine virtuelle Strömungssimulation (siehe Abbildung 2). In einem solchen Programm lassen sich zum Beispiel die aerodynamischen Eigenschaften von Ventilen, Flugzeugflügeln oder Schaltschränken analysieren. Die Idee dieser Analyse ist nicht neu, jedoch liegt auch hier die Besonderheit in der Geschwindigkeit, mit der die Berechnungen durchgeführt werden. Eine einzelne detaillierte Strömungssimulation von komplexen Geometrien kann unter Umständen Tage oder gar Wochen dauern. Das Ausprobieren und Analysieren von einigen wenigen Konfigurationen kann damit Monate in Anspruch nehmen, bis die grundlegende Idee eines ersten Prototyps zustande kommt. Ziel am Fraunhofer IGD ist auch hier eine interaktive Simulation, d.h. einzelne Zeitschritte werden in Bruchteilen von Sekunden berechnet und das Ergebnis wird direkt auf dem Bildschirm dargestellt. Eine solche Herangehensweise ermöglicht die direkte Manipulation von Geometrie während eines Simulationslaufs, um so auf die aerodynamischen Eigenschaften Einfluss zu nehmen. In einem Schaltschrank ist beispielsweise ein funktionierender Wärmeabtransport wichtig, so dass eine Überhitzung kritischer Bauteile vermieden wird. Bei der Auslegung ist meist die Anordnung der einzelnen Komponenten wählbar und eine kleine Änderung innerhalb des Schrankes kann un-

ter Umständen zu einer deutlichen Verbesserung der lokalen Wärmeverteilung beitragen. In einer frühen Entwicklungsphase können somit durch das Ausprobieren vieler Konfigurationen schneller Erkenntnisse gewonnen werden, um beispielsweise die Kühlleistung zu reduzieren und damit Strom zu sparen.

Für beide Anwendungsbeispiele leistet die neuartige Many-Core Hardwarearchitektur mit ihrer enormen Rechenleistung einen deutlichen Beitrag zum Erreichen von interaktiven Simulationen.

#### Compute Unified Device Architecture, CUDA

CUDA ist ein Programmiermodell, Befehlssatz und eine parallele Hardwarearchitektur zur einfachen Entwicklung paralleler Algorithmen auf NVIDIA GPUs. Die vertraute Programmiersprache C wurde um drei essentielle Konzepte erweitert: a) eine hierarchisch adressierbare Strukturierung von Thread-Gruppen, b) ein Shared Memory-Modell und c) Synchronisationsobjekte. Diese Schlüsselkonzepte ermöglichen feingranulare Datenparallelität, grobgranulare Task-Parallelität und hohe Skalierbarkeit.

#### Graphisch-Interaktive Systeme TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Michael Goesele  
Tel. 06151/155 664  
E-Mail: michael.goesele@gris.tu-darmstadt.de  
[www.gris.informatik.tu-darmstadt.de/~mgoesele/](http://www.gris.informatik.tu-darmstadt.de/~mgoesele/)

Prof. Dr.-techn. Dieter W. Fellner  
Tel. 06151/155 100  
E-Mail: institutsleitung@igd.fraunhofer.de  
[www.igd.fhg.de/Fellner](http://www.igd.fhg.de/Fellner)

Dipl.-Inform. Sven Widmer  
Tel. 06151/155 665  
E-Mail: sven.widmer@gris.tu-darmstadt.de  
[www.gris.tu-darmstadt.de/home/members/widmer](http://www.gris.tu-darmstadt.de/home/members/widmer)

Dipl.-Inform. Dominik Wodniok  
Tel. 06151/155 665  
E-Mail: dominik.wodniok@gris.tu-darmstadt.de  
[www.gris.tu-darmstadt.de/home/members/wodniok](http://www.gris.tu-darmstadt.de/home/members/wodniok)

#### Industrielle Anwendungen Fraunhofer IGD

Dipl.-Inform. Daniel Weber  
Tel. 06151/155 202  
E-Mail: daniel.weber@igd.fraunhofer.de  
[www.igd.fhg.de/Weber](http://www.igd.fhg.de/Weber)

Prof. Dr. André Stork  
Tel. 06151/155 469  
E-Mail: andre.stork@igd.fraunhofer.de  
[www.igd.fhg.de/Stork](http://www.igd.fhg.de/Stork)

Unsere  
Mitarbeiter  
machen den  
Unterschied!

**DEVOTEAM**  
Consulting • Solutions • Expertise



Wir sind ein international führender Anbieter von ITK-Dienstleistungen. Unser Leistungsangebot umfasst Consulting, ITK-Solutions und ITK-Services. Unsere Kunden erwarten von ihrem Dienstleister direkten Mehrwert und Nutzen. Dies leben wir. Sie vertrauen uns. Was uns dabei auszeichnet, sind unsere Mitarbeiter. Sie machen nicht nur den Unterschied aus, sie ermöglichen es uns, dass wir erfolgreich am Markt agieren. Ihr Wissen und die Themenkompetenz der Gruppe sind unser eigentliches Kapital.

**Wann sind Sie dabei?**

Devoteam Danet GmbH  
Human Resource Management  
Natalija Kolar  
Gutenbergstraße 10 - 64331 Weiterstadt  
Tel.: 06151/868-7275  
Natalija.Kolar@devoteam.com  
www.devoteam.de

CONNECTING BUSINESS & TECHNOLOGY

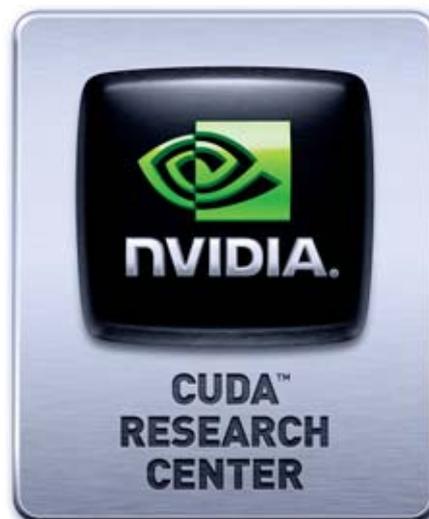
Zwar vereinfachen die ausgewählten oder speziell entwickelten Algorithmen verschiedene physikalische Sachverhalte, um die Simulation zu beschleunigen. Dennoch trägt die Parallelisierung und die damit verbundene simultane Ausführung auf Hunderten Prozessoren den größten Teil dazu bei, dass diese neuartige Art von Simulationen durchgeführt werden kann.

#### CUDA Research Center

Die TU Darmstadt sowie das Fraunhofer IGD erhielten im Jahr 2010 von NVIDIA die Anerkennung als CUDA Research Center. Dies ermöglicht den beiden Institutionen einen besseren Zugriff auf technische Details von GPUs, Support bei der Entwicklung

aktueller Projekte und Forschungsaufgaben sowie die Möglichkeit gezielter Schulungen durch NVIDIA. Das CUDA Research Center wird in Zukunft regelmäßig CUDA-Workshops veranstalten, um eine bessere Vernetzung aller Bereiche in Darmstadt, die CUDA einsetzen zu ermöglichen. Weiterhin findet auch regelmäßig die Lehrveranstaltung Programming Massively Parallel Processors (PMPP) statt, in der Studierende mit Hilfe von CUDA aktuelle Fragestellungen aus verschiedensten Forschungsbereichen bearbeiten.

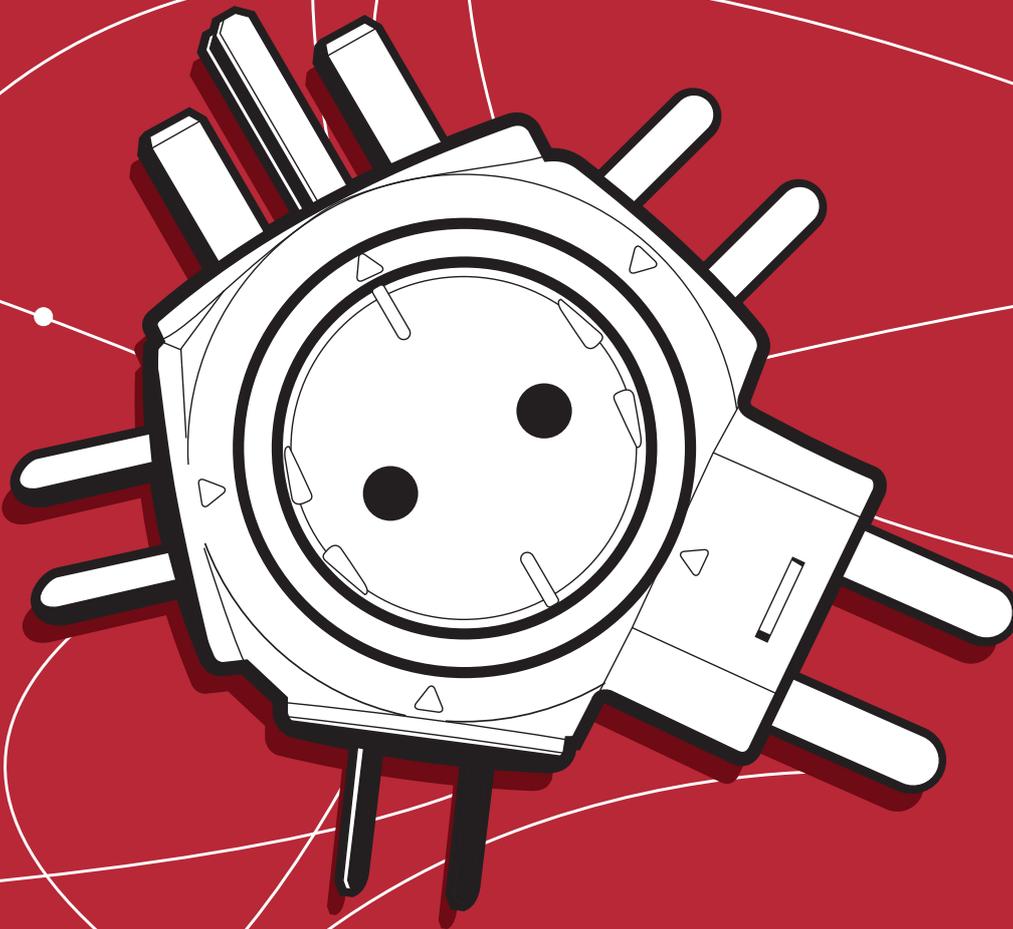
Abbildung 3  
CUDA Research Center.



#### Literatur

[Berkeley06]: Krste Asanovic, Ras Bodik, Bryan Christopher Catanzaro, Joseph James Gebis, Parry Husbands, Kurt Keutzer, David A. Patterson, William Lester Plishker, John Shalf, Samuel Webb Williams and Katherine A. Yelick, (2006: The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley; Berkeley) Technical Report No. UCB/EECS-2006-183, University of California at Berkeley

[Wienke11]: Sandra Wienke, Dmytro Plotnikov, Dieter an Mey, Christian Bischof, Ario Hardjosuwito, Christof Gorgels, Christian Brecher, (2011, Simulation of Bevel Gear Cutting with GPGPUs – Performance and Productivity; Computer Science – Research and Development: Volume 26, Issue 3 (2011), Page 165)



## > EIN JOB PASST IMMER ...

**Jobs, Praktika, Stellen:**  
Hier findest Du alles!

**Viele neue Angebote jeden Tag –**  
für Studierende, Absolventinnen und Absolventen.

Finde Deinen Job auf  
**[www.stellenwerk-darmstadt.de](http://www.stellenwerk-darmstadt.de)**

# stellenwerk

*das Jobportal  
der TU Darmstadt*



**Jetzt  
neu!**

studentenwerk darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# Effizienz durch adaptive Simulationsverfahren

Warten. Minuten-, stunden-, manchmal gar tagelanges Warten auf die Ergebnisse einer Computersimulation ist ein Zustand, den jeder Ingenieur, Entwickler und Wissenschaftler, dessen Tätigkeitsbereich Computersimulationen umfasst, allzu gut kennt. Und da Simulationen den etablierten Produktentwicklungsprozess mittels Prototypenbau zunehmend ersetzen, wird die Gemeinde der Wartenden stets größer. Dieser Beitrag stellt sogenannte adaptive Verfahren vor, deren Anwendung die Effizienz von Computersimulationen drastisch erhöht. Wartezeiten werden dadurch verkürzt und somit Entwicklungskosten reduziert, denn schließlich gilt ‚Zeit ist Geld‘.

## ► Efficiency through Adaptivity

*Waiting. Minutes, hours, even days of waiting for the results of a computer simulation: Every engineer, developer and scientist doing computer simulations knows the state of waiting more than enough, and as simulations replace prototyping as a standard tool in product design the number of people waiting grows day by day. This article presents a class of adaptive methods, which dramatically increase the efficiency of computer simulations. This cuts down waiting time and, hence, reduces development costs as 'time is money'.*

**Jens Lang, Martin Lilienthal, Sascha Schnepf •**

Der erste Schritt bei einer Computersimulation besteht darin, das zu betrachtende Modell mit seinen physikalischen Gleichungen in eine Form zu bringen, die sich mit Hilfe eines Computers berechnen lässt. Dazu wird das Lösungsgebiet in eine Vielzahl kleiner Flächen oder Volumen aufgeteilt. In jeder dieser Zellen wird die Lösung durch eine Anzahl von Zahlenwerten dargestellt, den sogenannten

Freiheitsgraden, welche die Lösung möglichst gut approximieren sollen. Diesen Schritt bezeichnet man als Diskretisierung.

Im einfachsten Fall erfolgt die Aufteilung des Lösungsgebiets in gleichmäßige Dreiecke, Tetraeder oder Hexaeder. Die erzielbare Genauigkeit der numerischen Approximation ist nun abhängig von der Größe der Zellen und der Anzahl von Zahlenwerten pro Zelle, kurzum von der Anzahl der Freiheitsgrade. Diese Zahl kann jedoch nicht beliebig hoch gewählt werden, da jeder Freiheitsgrad die Kosten der Simulation, gemessen in Speicherbedarf und Rechenzeit, erhöht. Angemessene Diskretisierungen großer Anwendungen aus der Ingenieurspraxis beinhalten häufig eine Anzahl von Freiheitsgraden im Bereich von Millionen.

Typischerweise gibt es Bereiche, in denen die Lösung lokal große Variationen oder eine hohe Dynamik aufweist, als auch Gebiete in denen sich die Lösung in Raum und Zeit nur wenig verändert. Ziel einer adaptiven Simulation ist es nun, die Diskretisierung dem Verhalten der Lösung anzupassen, um das Verhältnis von Genauigkeit zu Freiheitsgraden zu maximieren. Werden zeitabhängige Probleme betrachtet, muss sich die Diskretisierung zudem dynamisch der Zeitentwicklung der Lösung anpassen. Insbesondere bei der Untersuchung von Mehrskalproblemen, welche Effekte auf stark unterschiedlichen Größen- oder Zeitskalen beinhalten, erzielen adaptive Algorithmen drastische Aufwandsreduktionen und steigern damit die Effizienz des Lösungsprozesses.

### Wie lassen sich adaptive Verfahren umsetzen?

Ein allgemeines Diskretisierungsverfahren für partielle Differentialgleichungssysteme ist die Finite Elemente Methode (FEM). Bei der FEM wird die Lösung zellweise durch eine Linearkombination polynomialer Ansatzfunktionen approximiert. Es können auch spezielle problemangepasste Ansatzfunktionen gewählt werden. Die Gewichte der einzelnen Ansatzfunktionen sind die Freiheitsgrade der Zelle. Zur Adaption der Approximationsgenauigkeit stehen somit die Zellgröße  $h$  und der maximale Polynomgrad  $p$  zur Verfügung (siehe Infobox).

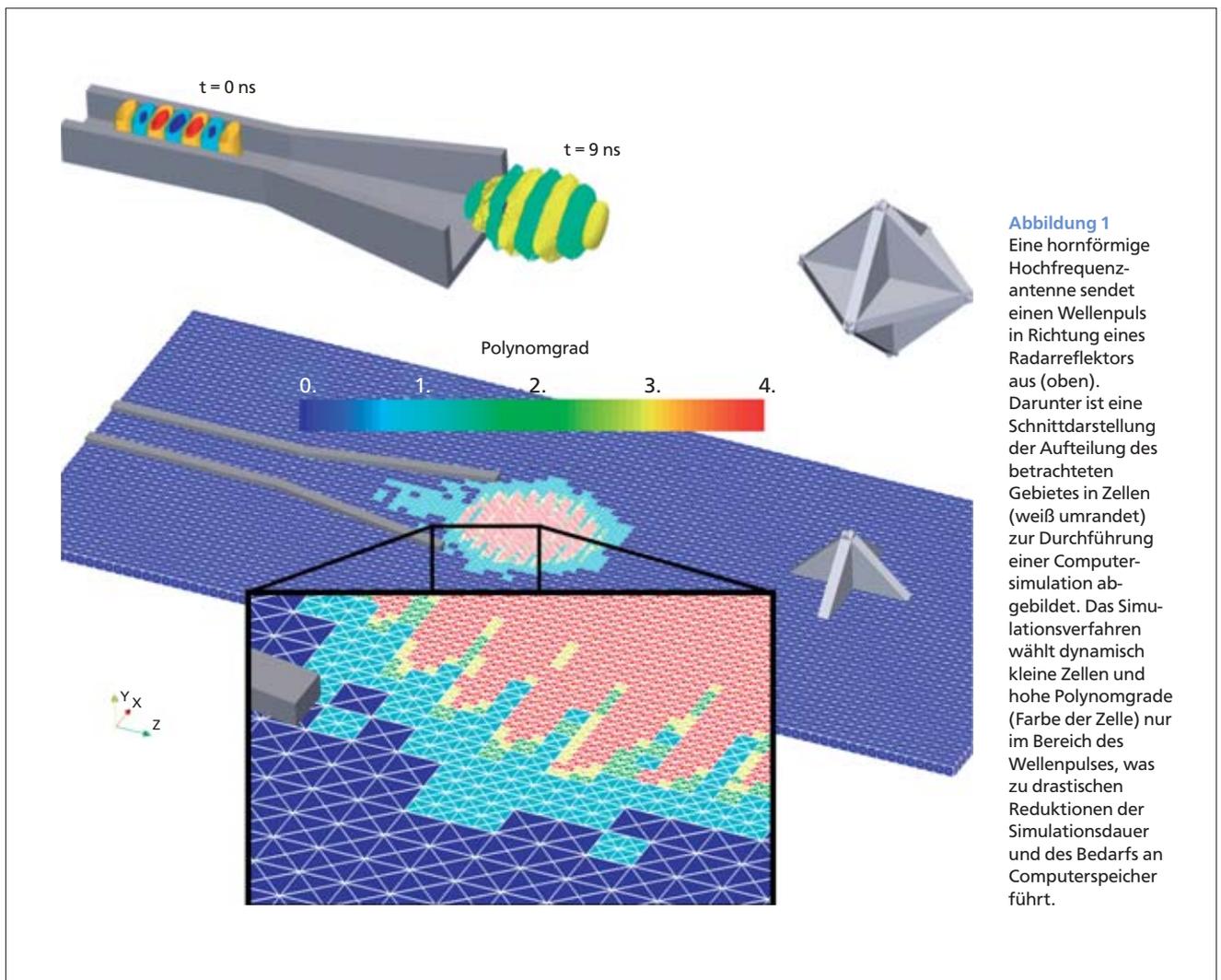
Das kritische Maß bei der Beurteilung der Qualität eines numerischen Verfahrens ist die Konvergenzrate. Sie beschreibt, wie effizient ein Verfahren

### Die Adaptionstechniken im Überblick

**h-Adaption:** Lokales Verkleinern von Zellen (Kantenlänge  $h$ ) erlaubt es, den Fehler mit algebraischer Rate zu reduzieren.

**p-Adaption:** Der Grad der approximierenden Polynome  $p$  wird lokal erhöht. Im Gegensatz zur h-Adaption können exponentielle Konvergenzraten für hinreichend glatte Lösungen erzielt werden.

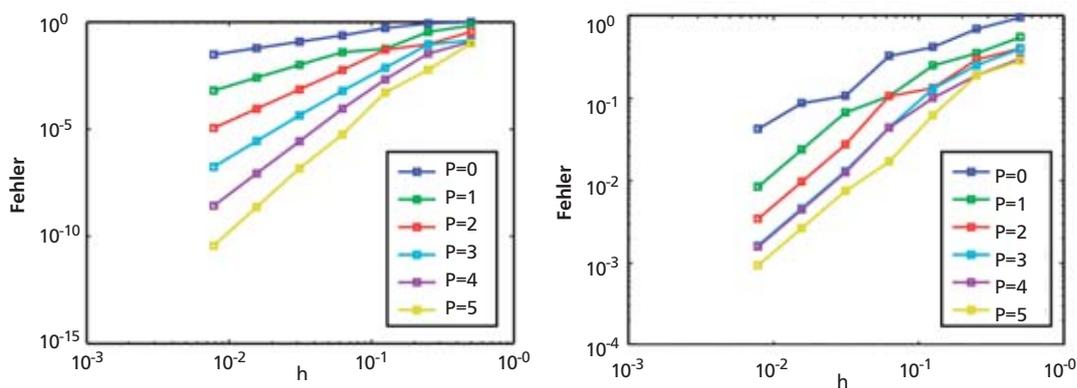
**hp-Adaption:** Wird in Bereichen mit glatter Lösung eine p- und sonst eine h-Adaption durchgeführt, ist es möglich, auch für lokal nicht glatte Lösungen eine exponentielle Konvergenzrate zu erzielen.



**Abbildung 1**  
Eine hornförmige Hochfrequenzantenne sendet einen Wellenpuls in Richtung eines Radarreflektors aus (oben). Darunter ist eine Schnittdarstellung der Aufteilung des betrachteten Gebietes in Zellen (weiß umrandet) zur Durchführung einer Computersimulation abgebildet. Das Simulationsverfahren wählt dynamisch kleine Zellen und hohe Polynomgrade (Farbe der Zelle) nur im Bereich des Wellenpulses, was zu drastischen Reduktionen der Simulationsdauer und des Bedarfs an Computerspeicher führt.

eine Erhöhung der Anzahl an Freiheitsgraden in die Verbesserung der Approximationsgenauigkeit umsetzt. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Beide Grafiken zeigen den Approximationsfehler in Abhängigkeit der Zellgröße, wobei der Polynomgrad der Scharparameter ist. Während in der linken Grafik, die Steigung der Kurven mit jeder Erhöhung von  $p$  zunimmt, ist dies in der rechten Grafik nicht der Fall. Dort stagniert die Steigung bei Variation von  $p$  und der Fehler erreicht bei ver-

gleichbarer Zellgröße lediglich einen Wert von  $10e-3$ , anstelle von  $10e-11$  links. Die Konvergenzrate entspricht der Steigung der Kurven und erreicht links den optimalen Wert für gegebenen Polynomgrad. Rechts wird dagegen nur suboptimale Konvergenz erzielt. Die Verwendung hoher Polynomgrade ermöglicht somit hohe Konvergenzraten (wie Abbildung 2 links zeigt), so dass hohe Werte von  $p$  prinzipiell kleinen Zellgrößen vorzuziehen sind. Diese Aussage gilt jedoch nur mit



**Abbildung 2**

Konvergenz des Approximationsfehlers in Abhängigkeit der Zellgröße  $h$  für eine glatte Lösung (links) und eine nicht-glatte Lösung, welche Knickstellen im Verlauf aufweist (rechts). Nur im Falle glatter Lösungen führt eine Erhöhung des Polynomgrades  $p$  unmittelbar zu einer verbesserten Konvergenzrate.

Einschränkung. Ist die Lösung nicht glatt, so ist die Konvergenzrate auf niedrige Werte beschränkt, wie in Abbildung 2 rechts gezeigt.

#### Warum sind hp-adaptive Verfahren so effizient?

Alle Formen der Adaptivität – lokale Anpassung der Zellgröße  $h$ , des Polynomgrades  $p$  oder eine Kombination von beiden – verbessern die Verfahrenseffizienz, wobei die beste Wahl problem-

abhängig ist. Besonders interessant ist die hp-Adaption, die auch für nicht glatte Lösungen optimale Konvergenz ermöglicht. Hierzu müssen  $h$ - und  $p$ -Adaptionen lokal geschickt derart gewählt werden, dass in glatten Bereichen der Lösung hohe Polynomgrade und andernfalls kleine Zellen gewählt werden [1]. Wird für zeitabhängige Probleme zudem auch eine adaptive Diskretisierung in der Zeit vorgenommen, so werden alle Möglichkeiten der Effizienzsteigerung ausgeschöpft [2].

#### AG Numerische Mathematik und wissenschaftliches Rechnen

Prof. Dr. Jens Lang  
Tel. 06151/16-2389  
E-Mail: lang@mathematik.tu-darmstadt.de  
[www.mathematik.tu-darmstadt.de/~lang](http://www.mathematik.tu-darmstadt.de/~lang)

#### Graduate School of Computational Engineering

MSc. Martin Lilienthal  
Tel. 06151/16-70981  
E-Mail: lilienthal@gsc.tu-darmstadt.de

Dr. Sascha Schnepf  
Tel. 06151/16-70948  
E-Mail: schnepf@gsc.tu-darmstadt.de  
[www.graduate-school-ce.de/Sascha\\_Schnepf](http://www.graduate-school-ce.de/Sascha_Schnepf)

#### Adaption im Elektromagnetismus – innovative Beispiele

##### • Das TEAM 7 Benchmark Problem [3]

Bei Benchmark Problemen handelt es sich um exakt definierte Probleme, für die sehr genaue Ergebnisse vorliegen. Die Simulation eines Benchmark Problems erlaubt daher den objektiven Vergleich verschiedener Simulationsverfahren. Im Folgenden wird das TEAM 7 Problem untersucht [3].

Durch eine Spule, die über einer rechteckigen Aluminiumplatte mit einem Loch positioniert wird (siehe Abbildung 3 oben), fließt ein zeitlich sinusförmiger Strom, der einen Stromfluss in der Platte

induziert. Die zeitliche und räumliche Dynamik der Lösung hängt stark von der Amplitude des eingepprägten Stromes in der Spule ab. Abbildung 3 zeigt die gewählten lokalen Zeitschritte und die Anzahl der Zellen. Das Verfahren verwendet eine h-Adaptation bei vorgegebenen Genauigkeitstoleranzen. Erreicht der Strom seinen maximalen absoluten Wert, so wählt das adaptive Verfahren automatisch sehr kleine Zeitschritte sowie eine entsprechende hohe räumliche Auflösung.

- **Magnetisches Beschreiben einer Festplatte [2]**  
Der in Abbildung 4 dargestellte Festplattenschreibkopf stellt ein weiteres Benchmark Problem dar. Die Speicherung von Daten erfolgt durch Magnetisierung der Plattenoberfläche, die mit einer hartmagnetischen Schicht versehen ist. Eine besondere Schwierigkeit bei der Modellierung und Simu-



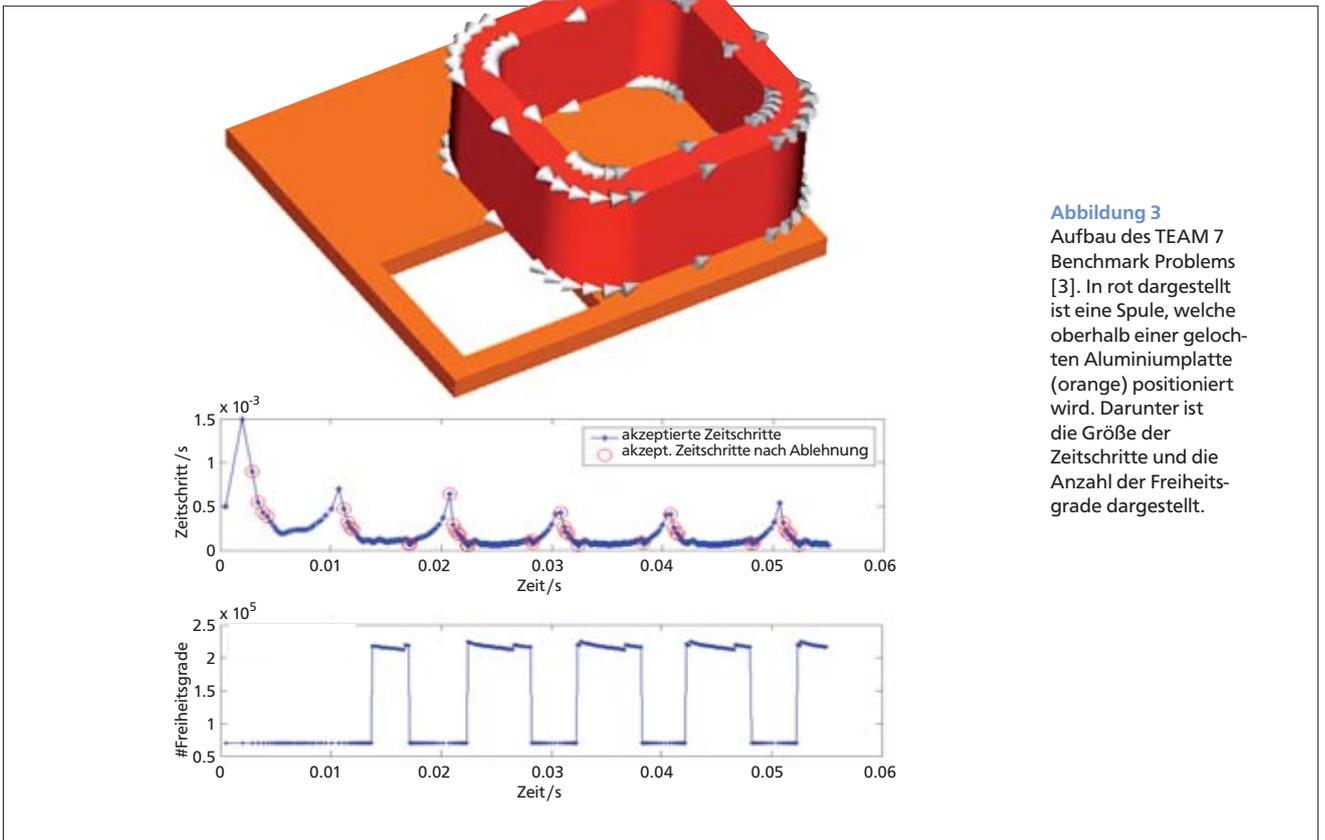
**Jens Lang** ist Professor am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und leitet die Arbeitsgruppe Numerik und Wissenschaftliches Rechnen. Er ist Principal Investigator an der Graduate School Computational Engineering.

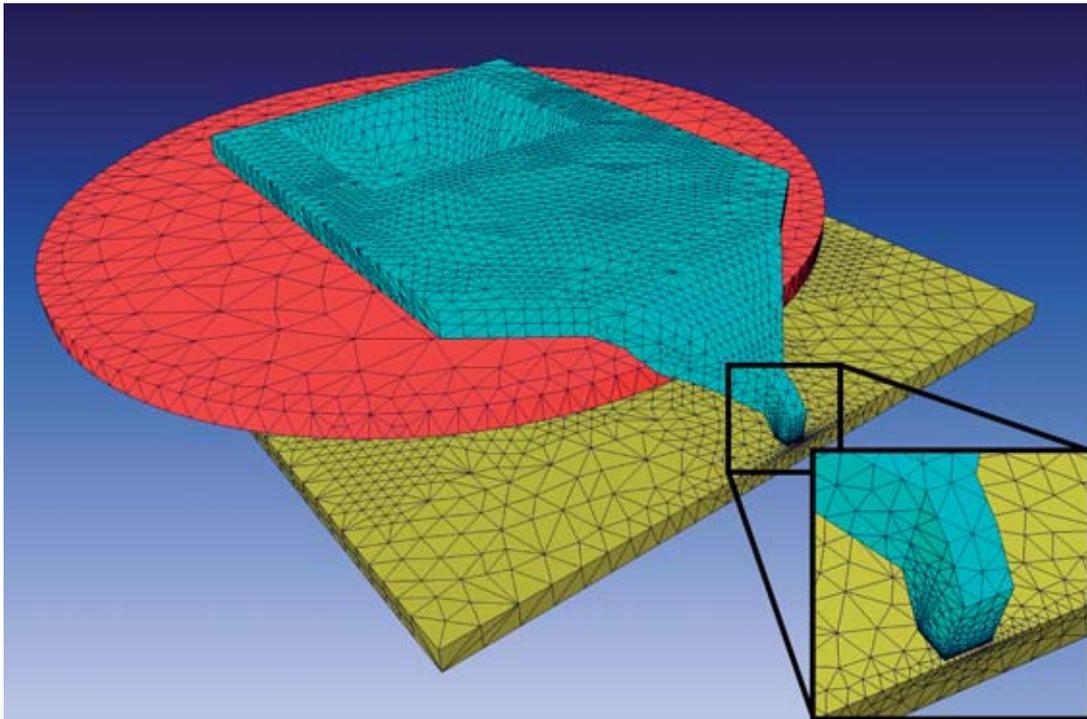


**Martin Lilienthal** ist Doktorand an der Graduate School of Computational Engineering der TU Darmstadt und forscht an adaptiven Simulationsverfahren.



**Sascha Schnepf** ist Leiter der Nachwuchsforschergruppe Computational Electromagnetics an der Graduate School Computational Engineering.





**Abbildung 4**  
Modell eines Festplattenschreibkopfes gemäß eines Benchmark Problems und Diskretisierung. Die Vergrößerung zeigt die Verwendung besonders kleiner Zellen im kritischen Bereich der Schreibkopfspitze.

lation stellt das Permalloy-Material der Halterung dar, da dieses einen stark nicht-linearen Verlauf der Permeabilität (charakteristische Kenngröße magnetischer Materialien) in Abhängigkeit der Magnetfeldstärke aufweist. Das adaptive Verfahren wählt im kritischen Bereich der Schreibkopfspitze besonders kleine Zellen.

• **Simulation kurzer Pulse**

Die Propagation zeitlich kurzer Pulse ist ein ideales Anwendungsgebiet adaptiver Verfahren. Abbildung 1 zeigt eine hornförmige Hochfrequenzantenne (in Schnittdarstellung), welche auf einen Radarreflektor (im Bild rechts) gerichtet ist. Die Antenne strahlt einen elektromagnetischen Wellenpuls ab, der zu

ANZEIGE



**schunk edv systeme gmbh**  
Die IT-Infrastruktur Spezialisten

Stehnweg 2 - 63500 Seligenstadt  
Tel 06182 8248 0 - Fax 06182 8248 199  
eMail info@schunk.net - www.schunk.net

den Zeitpunkten 0 ns und 9 ns dargestellt ist. Darunter ist die Diskretisierung in einer Schnittdarstellung und eine Vergrößerung des Bereiches um den Wellenpuls abgebildet. Die dynamische Adaption der Zellgröße  $h$  und des Polynomgrades  $p$  ermöglicht eine drastische Reduktion der Freiheitsgrade. Während eine gleichmäßige Diskretisierung des Problems zu mehr als 7,5 Milliarden Freiheitsgraden führen würde, verwendet die adaptive Diskretisierung zwischen 5 und 39 Millionen Freiheitsgraden. Dies entspricht einer Reduktion um einen Faktor von 200 bis 1500.

#### Entscheidende Vorteile

Die Anwendung von adaptiven Verfahren zur Simulation von komplexen physikalischen Problemen eröffnet neue, zeiteffiziente Möglichkeiten im computergestützten Ingenieurdesign. Der Einsatz von lösungsangepassten lokalen Verfeinerungsstrategien entscheidet immer häufiger darüber, ob ein Problem mit einer geforderten Genauigkeit noch lösbar ist oder nicht. Neben drastischen Einsparungen an Rechenzeit und damit auch von Ent-

wicklungskosten durch die deutliche Verringerung der Anzahl an Freiheitsgraden gegenüber Standardverfahren mit uniformen Diskretisierungen besteht der große Vorteil von adaptiven Verfahren darin, dass eine quantitative Information über den Simulationsfehler und damit über die Güte der berechneten numerischen Lösungen mitgeliefert wird. Aufwendige Anstrengungen zur Validierung der Lösung entfallen. Adaptive Verfahren nutzen Computerressourcen somit optimal und erhöhen gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse.

#### Literatur

[1] S. Schnepf und T. Weiland, Discontinuous Galerkin Methods with Transient hp-Adaptations, Radio Science (2011) Vol. 46

[2] M. Clemens, J. Lang, D. Teleaga und G. Wimmer, Adaptivity in Space and Time for Magnetoquasistatics, Journal of Computational Mathematics (2009) Vol. 27 (5)

[3] J. Lang, D. Teleaga, Towards a Fully Space-Time Adaptive FEM for Magnetoquasistatics, IEEE Trans. Magn. (2008) Vol. 44 (6)

—ANZEIGE





## Wasser ist unsere Leidenschaft

***dazu brauchen wir  
Sie als Ingenieur/in***

**PWT Wasser- und  
Abwassertechnik GmbH**  
Platanenallee 55  
64673 Zwingenberg

Telefon: 06251 980-0  
Telefax: 06251 980-498  
hoffmann.monika@pwt.de  
www.pwt.de

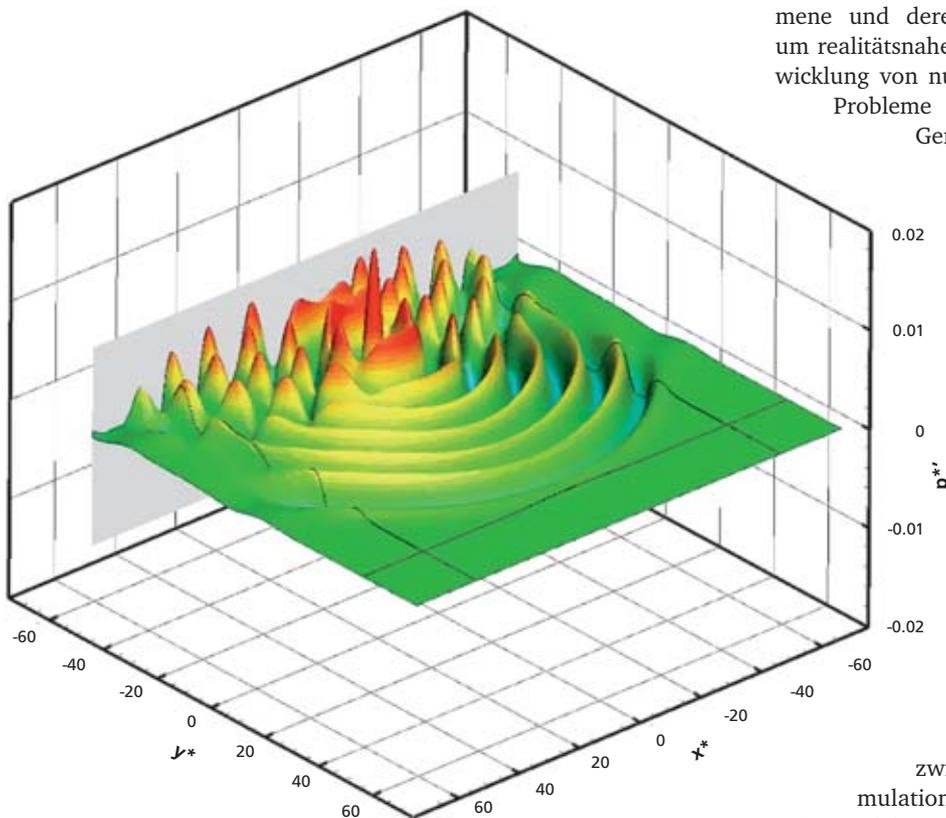
# Multiphysik – neue Einsichten

## durch gekoppelte Simulation

Nachdem die Physik über Jahrhunderte in immer kleinere Disziplinen eingeteilt wurde, um Phänomene in mathematischen Modellen abzubilden, ist mit den gewachsenen Rechnerkapazitäten der Zeitpunkt gekommen, die Disziplinen über die Simulation wieder zu vereinen. Die Simulation solcher gekoppelten Systeme ist ein Forschungsschwerpunkt am Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren der TU Darmstadt.

### ► *Multiphysics – Coupled Simulations on High Performance Computers*

*To represent phenomena into mathematical models the physics had been split into different disciplines over centuries. Now, with the grown computational capacities, the time has been reached to merge the disciplines via simulations. The simulation of such systems is one focus at the Institute of Numerical Methods in Mechanical Engineering at TU Darmstadt.*



**Abbildung 1**  
Schallquelle vor einer Wand.  
Der Schalldruck einer pulsierenden Schallquelle wird an der Wand reflektiert und breitet sich in das Gebiet aus.

**Dörte C. Sternel, Michael Schäfer** • Lärm ist eine Umweltbelastung, der wir täglich ausgesetzt sind und die einen starken Einfluss auf unsere Gesundheit ausüben kann. Als Beispiele seien der viel diskutierte Fluglärm oder der Lärm von Ventilatoren und Klimaanlage genannt. Erzeugt wird dieser Lärm von Strömungen, zum Teil als reiner Strömungslärm, zum Teil als Folge der Wechselwirkung mit vibrierenden Strukturen. Um Lärm zu reduzieren bzw. schon beim Design von Produkten auf geringe Lärmentwicklung zu achten, ist ein möglichst genaues Verständnis der Lärmentstehung notwendig. Dafür können numerische Simulationen einen wichtigen Beitrag leisten.

Die Lärmentstehung ist ein Beispiel sogenannter multiphysikalischer Probleme, die eine Einbeziehung verschiedener physikalischer Phänomene und deren Wechselwirkungen erfordern, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Die Entwicklung von numerischen Verfahren, um solche

Probleme effizient und mit zuverlässiger Genauigkeit berechnen zu können,

ist ein Schwerpunkt der Forschung am Fachgebiet für Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau (FNB).

In verschiedenen Bereichen der Physik haben sich unterschiedliche Verfahren zur Simulation etabliert, die bestimmte Vorzüge für die jeweilige Disziplin bieten. Eine Herangehensweise, um gekoppelte Simulationen multiphysikalischer Systeme durchzuführen, ist es, die Simulationen der Einzelphänomene über Schnittstellen miteinander

zu verbinden und die Daten zwischen den unterschiedlichen Simulationsprogrammteilen auszutauschen.

Eine solche Strategie wird als partitionierte Methode bezeichnet.

Die genaue und effiziente Simulation eines multiphysikalischen Gesamtproblems erfordert nicht nur Genauigkeit und Effizienz für die Einzelprobleme

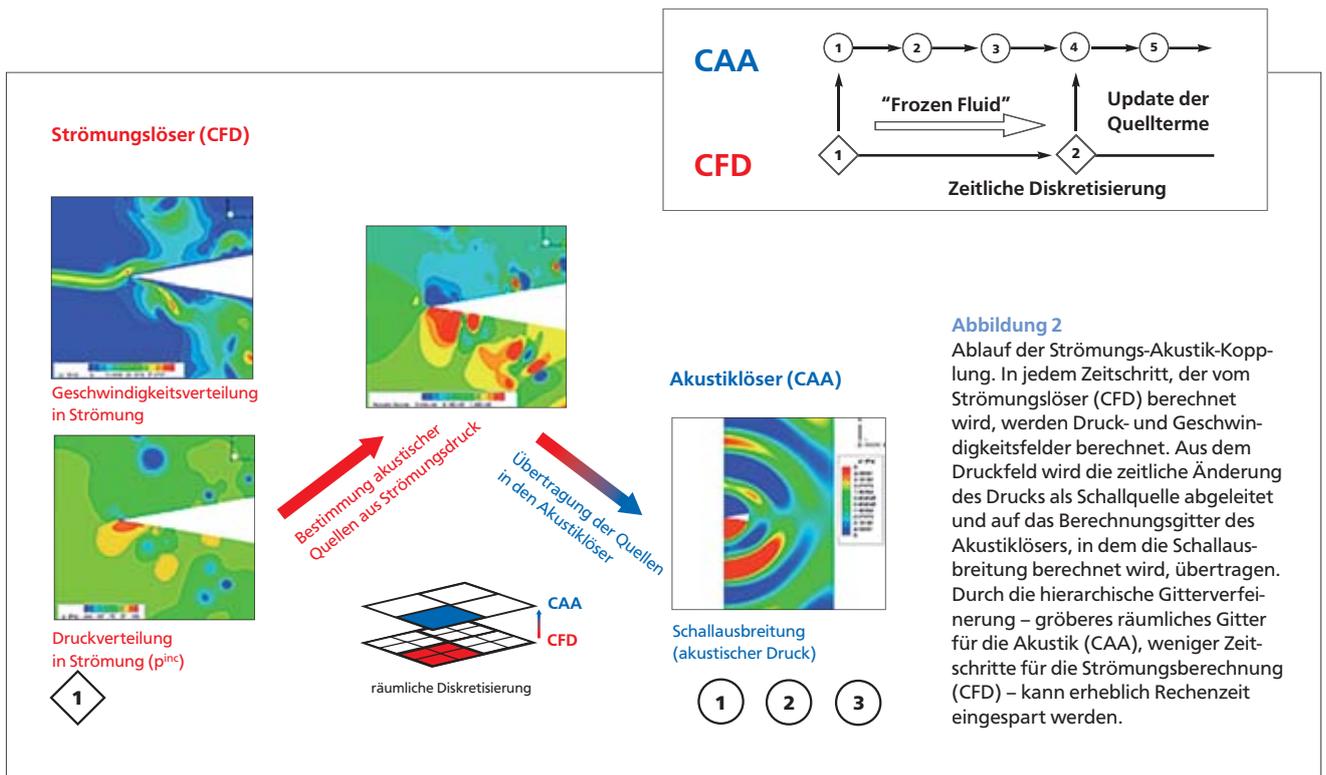


Abbildung 2

Ablauf der Strömungs-Akustik-Kopplung. In jedem Zeitschritt, der vom Strömungslöser (CFD) berechnet wird, werden Druck- und Geschwindigkeitsfelder berechnet. Aus dem Druckfeld wird die zeitliche Änderung des Drucks als Schallquelle abgeleitet und auf das Berechnungsgitter des Akustiklöser, in dem die Schallausbreitung berechnet wird, übertragen. Durch die hierarchische Gitterverfeinerung – größeres räumliches Gitter für die Akustik (CAA), weniger Zeitschritte für die Strömungsberechnung (CFD) – kann erheblich Rechenzeit eingespart werden.

und eine adäquate Kopplung, sondern auch eine Abstimmung der Verfahren aufeinander. Zudem hat man es häufig mit sehr unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen zu tun, wie zum Beispiel für die Strömung und die Akustik, die angepasst abgebildet werden müssen.

Um parallele Hochleistungsrechner mit den verwendeten Verfahren zu nutzen, wird das Berechnungsgebiet räumlich zerteilt. Jeder Prozessor bearbeitet einen Bereich und die Informationen über angrenzende Bereiche werden regelmäßig ausgetauscht. Eine solche Berechnung verläuft nur effizient, wenn alle Prozessoren etwa gleich viel Rechenlast zu bearbeiten haben und die Kommunikation zwischen den Prozessoren möglichst gering gehalten werden kann. Für ein Verfahren für multiphysikalische Problemstellungen muss sichergestellt sein, dass die Methode sowohl in ihren Einzeldisziplinen, als auch im Gesamtsystem parallel effizient arbeitet.

Für die Berechnung von Strömungslärm wurde am FNB ein Verfahren adaptiert, das auf der Basis

#### Interaktion: Strömung-Struktur-Akustik

Die aerodynamischen Kräfte einer Strömung wirken auf eine Struktur und regen diese zu einer Bewegung an. Durch die resultierende Geometrieänderung wird das Strömungsfeld beeinflusst und damit ändern sich sowohl die aerodynamischen Kräfte auf die Struktur, als auch die Druck-/Dichteschwankungen, die wiederum als Schallquellen für die Akustik wirken (Aeroakustik). Vibriert die Struktur durch die Strömungsanregung, so entsteht hier ebenfalls Schall (Vibroakustik).

#### Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau

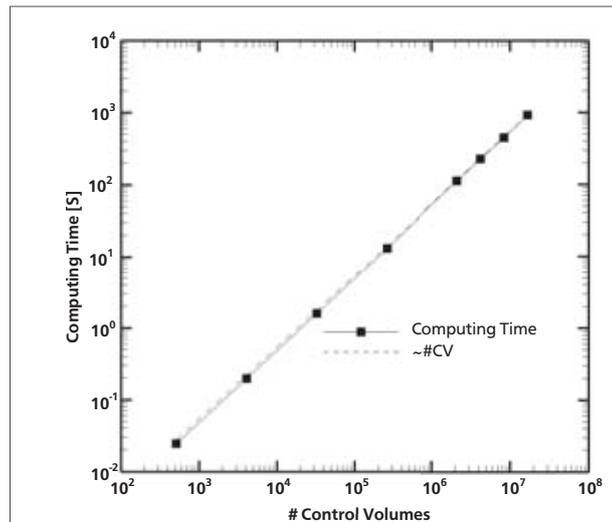
Dr.-Ing. Dörte C. Sternel  
Tel. 06151/16-5524  
E-Mail: sternel@fnb.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer  
Tel. 06151/16-2877  
E-Mail: schaefer@fnb.tu-darmstadt.de  
[www.fnb.tu-darmstadt.de](http://www.fnb.tu-darmstadt.de)

der Aufteilung der Strömung in einen inkompressiblen Teil, der „langsamen Hintergrundströmung“, und einen akustischen Teil besteht. Hierbei stellt sich schon die Simulation turbulenter Strömungen als eine große Herausforderung dar, die ohne den Einsatz von Hochleistungsrechnern für praxisrelevante Konfigurationen nicht bewältigt werden kann. Der Grund hierfür ist, dass zur Bestimmung des Strömungslärms keine vereinfachenden zeitlich mitteln Verfahren (statistische Turbulenzmodelle) genutzt werden können, da die zeitlichen Druckfluktuationen der Strömung als Quellen für die Akustik benötigt werden (Abbildung 2).

Um eine aufwändige Volumenkopplung zu vermeiden, ist der Akustiklöser in das Strömungsprogramm integriert. Bei der Strömungsakustik im niedrigen Machzahlbereich handelt es sich um ein Mehrskalproblem, da Längen- und Zeitskalen von Strömung und Akustik sehr unterschiedlich sind (Abbildung 3): die Akustik benötigt weit weniger feine räumliche Auflösung als der turbulente Strömungsteil. Hierzu wurde eine hierarchische Gittervergrößerung entwickelt, die auf der Infrastruktur eines vorhandenen geometrischen Mehrgitterverfahrens aufbaut. Um die unterschiedlichen Zeitskalen effizient zu berücksichtigen – hier kommt die Strömung mit einer größeren zeitlichen Diskretisierung aus, findet eine Kopplung nicht in jedem Zeitschritt statt. Insgesamt hat man damit ein Verfahren, das eine effiziente Simulation von Strömungslärm ermöglicht.

Ein weiteres Forschungsfeld am FNB ist die Simulation von Fluid-Struktur-Interaktionen. Hier wird das



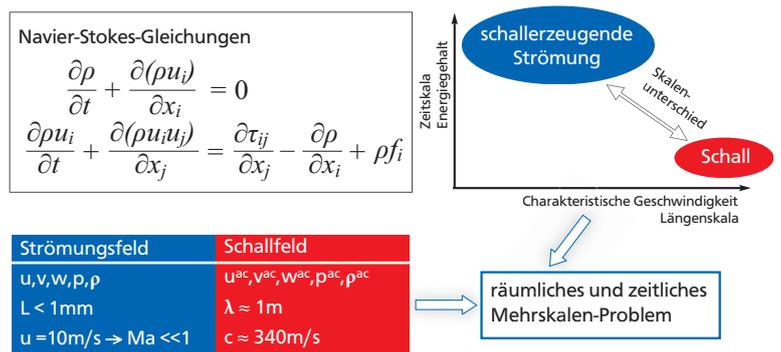
**Abbildung 4**

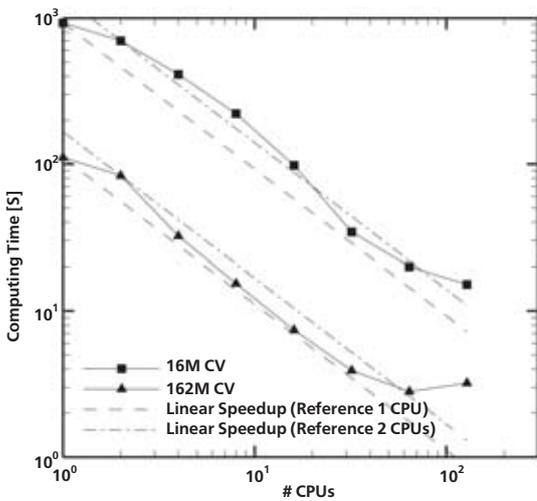
Um die Simulation praktisch relevanter Anwendungen zu rechnen, ist der Einsatz von Parallelrechnern notwendig. Auf der linken Seite ist die Rechenzeit des Akustiklösers über der Anzahl der verwendeten Kontrollvolumen aufgetragen. Der lineare Verlauf zeigt an, dass das implementierte Verfahren optimal skaliert.

Programm, das das Strömungsfeld und die Kräfte auf eine Struktur berechnet, über eine externe Schnittstelle mit einem Programm gekoppelt, das aus diesen Strukturverschiebung bestimmt und diese wiederum an das Strömungsprogramm sendet. Da sowohl die Strömungs-Struktur-Kopplung

**Abbildung 3**

Mehrskalenproblematik. Die Navier-Stokes-Gleichungen bilden sowohl Akustik, als auch die langsamere schallerzeugende Strömung ab. Allerdings sind Zeit- und Raumskalen sehr unterschiedlich und die direkte Simulation von Schall und Strömung mit diesen Gleichungen erfordert einen extrem großen numerischen Aufwand. Daher wird am FNB ein Ansatz verwendet, bei dem die Strömung in einen energietragenden inkompressiblen Strömungsteil und einen überlagerten akustischen Anteil aufgeteilt wird.





Auf der rechten Seite ist die Rechenzeit über der Anzahl der verwendeten Prozessoren (CPUs) einmal für 16 Millionen und einmal für 2 Millionen Kontrollvolumen aufgetragen. Auch hier wird – bis zu einer gewissen Prozessorzahl, die durch die Problemgröße bestimmt ist – ein nahezu optimaler Verlauf erreicht.

als auch die Strömungs-Akustik-Kopplung auf dem gleichen Strömungslöser basieren, lässt sich die Akustik der Strukturschwingungen direkt abbilden. Damit steht die Grundstruktur für ein effizientes Simulationsprogramm zur Fluid-Struktur-Akustik-Kopplung zur Verfügung.



**Dörte C. Sternel** leitet seit 2005 die Arbeitsgruppe „Strömung & gekoppelte Systeme“ am Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau.



**Michael Schäfer** ist seit 1996 Leiter des Fachgebiets Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau. Er ist Dekan der Graduiertenschule Computational Engineering.



Es gibt Geräusche, die am **Image** kratzen.



Selbst winzige Ursachen entfalten oft große Wirkung. Eine kleine Unwucht entpuppt sich auf diese Weise schnell als Geräuschbelästigung im Alltagsbetrieb und zum Makel eines ansonsten tadellosen Produkts. Ob groß oder klein – bei einer Vielzahl von Komponenten lassen sich durch Auswuchten störende Vibrationen von Anfang an vermeiden. Dank der Auswuchtlösungen von Schenck RoTec. [www.schenck-rotec.de](http://www.schenck-rotec.de)

The **DÜR** Group

**SCHENCK**  
THE ART OF ROTATION

# Optimierte Grenzschichtbeeinflussung durch Plasma-Aktuatoren

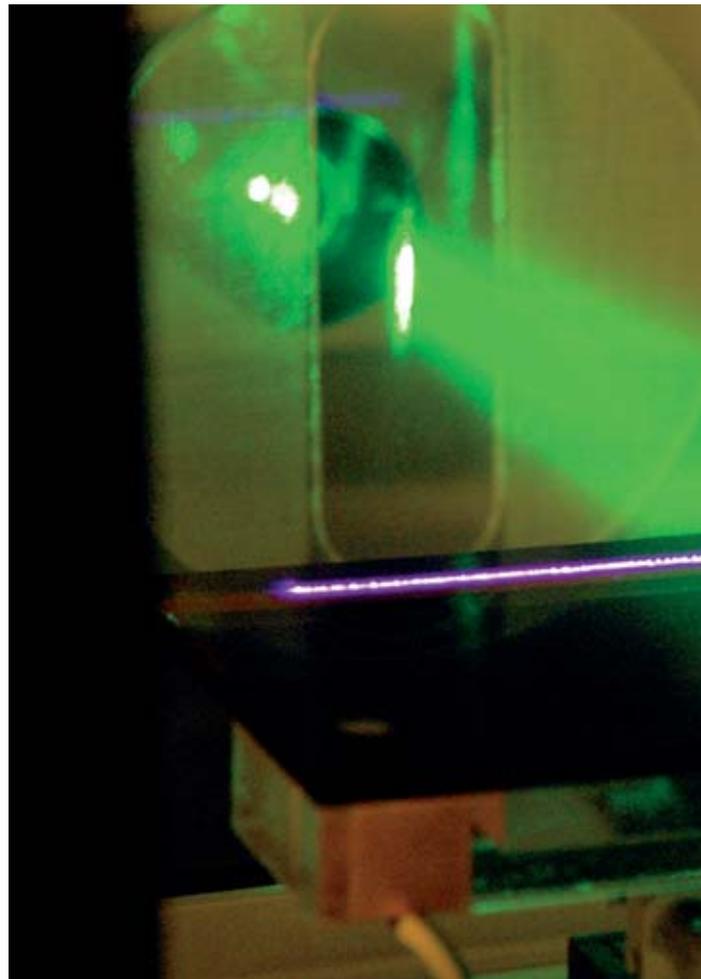
Der Reibungswiderstand eines Flugzeugs wird zu einem erheblichen Teil von der Oberflächenreibung in der Grenzschicht zwischen Flugzeughülle und umströmender Luft verursacht. Bei größeren Geschwindigkeiten bilden sich in der Grenzschicht turbulente Strukturen aus, welche die Oberflächenreibung deutlich erhöhen. Wie kann man die Entstehung turbulenter Grenzschichten bekämpfen und so das Potential zu effizienteren Flugzeugen schaffen? Ein Forschungsprojekt der Graduiertenschule CE beschäftigt sich mit der gezielten Strömungsbeeinflussung durch Plasma-Aktuatoren, deren Betriebsparameter durch mathematische Optimierungsverfahren gesteuert werden.

## ▶ *Optimized Boundary Layer Control by Plasma Actuators*

*A significant portion of aircraft drag arises from the skin friction in the boundary layer surrounding the aircraft body. For larger flow velocities turbulent structures develop in the boundary layer, which increase the skin friction considerably. How can the formation of turbulent boundary layers be delayed to yield lower drag; hence more efficient airplanes? A research project at the Graduate School CE considers the optimal control of flows by plasma actuators using methods from mathematical optimization.*

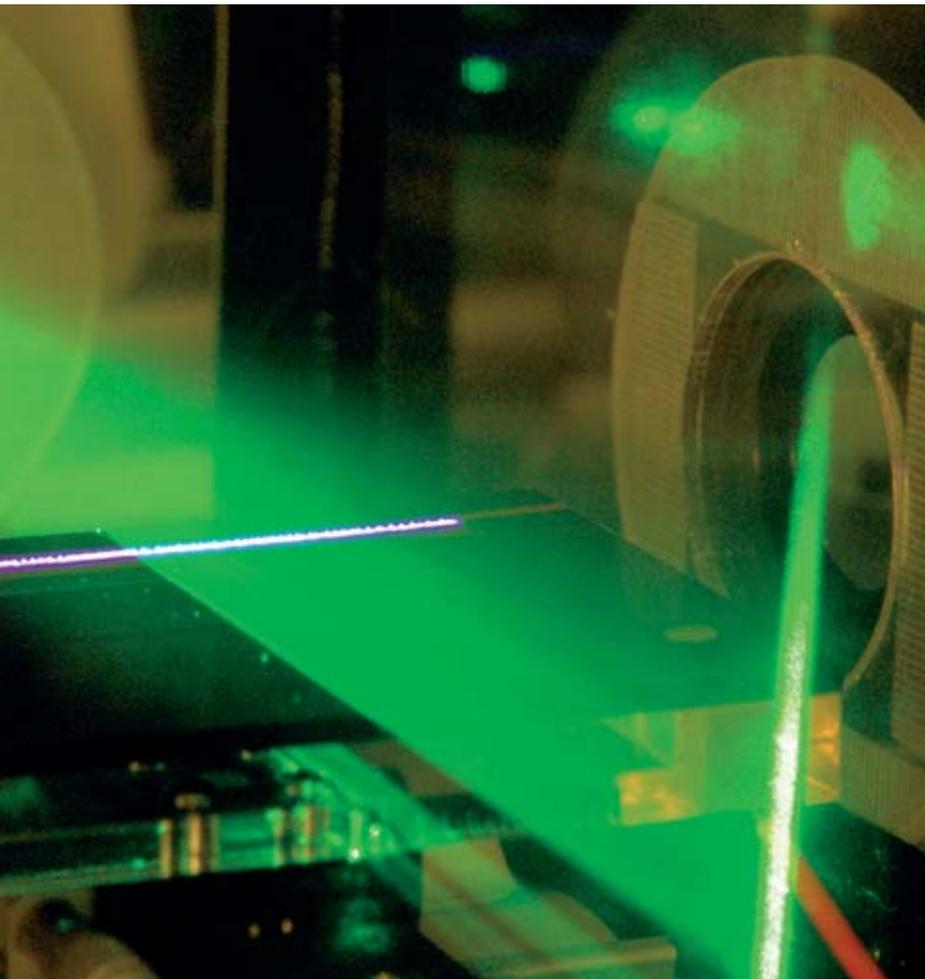
**Jane Ghiglieri, Sven Grundmann, Cameron Tropea, Stefan Ulbrich** • Die aktuellen Verkaufserfolge von zukünftigen energieeffizienteren Flugzeugmodellen zeigen, welche Bedeutung der Ressourcenverbrauch in der Luftfahrt hat. Bisherige Fortschritte bei der Verringerung des Strömungswiderstands von Flugzeugen wurden hauptsächlich durch die Geometrieoptimierung von Tragflügeln und Rumpf auf Basis von rechnerbasierten Strömungssimulationen erzielt. Um weitere Energieeinsparungen zu erreichen, kann man nun einen Schritt weitergehen. Eine Möglichkeit zur Reibungsreduktion ist dabei die Verzögerung der Transition – dem Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung. Dieser vielversprechende Ansatz wird aktuell intensiv untersucht und ist Gegenstand mehrerer Forschungsprojekte an der TU Darmstadt.

Um die Transition von laminarer zu turbulenter Strömung wirkungsvoll zu verzögern, muss man zunächst den Mechanismus dieses Übergangs verstehen. Tollmien-Schlichting Wellen gehören zu den Auslösern von Transition innerhalb der Grenzschicht einer flachen Platte. Diese zweidimensiona-



len Störwellen werden stromabwärts verstärkt und entwickeln sich zu dreidimensionalen Wirbelstrukturen, die aufgrund deutlich größerer Wand Schubspannungen eine höhere Reibung erzeugen. Gelingt es die Tollmien-Schlichting Wellen zu dämpfen oder gar auszulöschen, kann man diesen Prozess verzögern.

Eine komplette Auslöschung der Welle würde mit einer perfekt abgestimmten Gegenwelle erreicht werden. Während dies nur theoretisch möglich ist, bleiben in experimentellen/numerischen Versuchen immer Reste der Geschwindigkeitsfluktuationen bestehen, die stromabwärts wieder an-



Experimenteller Aufbau zur Laser-optischen Messung der aktuatorinduzierten Strömung mittels Particle Image Velocimetry (PIV).

#### Graduate School of Computational Engineering

Jane Ghiglieri  
Tel. 06151/16-70983  
E-Mail: [ghiglieri@gsc.tu-darmstadt.de](mailto:ghiglieri@gsc.tu-darmstadt.de)  
[www.graduate-school-ce.de](http://www.graduate-school-ce.de)

#### Center of Smart Interfaces

Sven Grundmann  
Tel. 06151/16-6212  
E-Mail: [grundmann@csi.tu-darmstadt.de](mailto:grundmann@csi.tu-darmstadt.de)  
[www.csi.tu-darmstadt.de](http://www.csi.tu-darmstadt.de)

#### Fachgebiet Nichtlineare Optimierung, Fachbereich Mathematik und Graduate School Computational Engineering

Stefan Ulbrich  
Tel. 06151/16-2487  
E-Mail: [ulbrich@mathematik.tu-darmstadt.de](mailto:ulbrich@mathematik.tu-darmstadt.de)  
[www.opt.mathematik.tu-darmstadt.de](http://www.opt.mathematik.tu-darmstadt.de)

#### Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik und Center of Smart Interfaces

Cameron Tropea  
Tel. 06151/16-64227  
E-Mail: [ctropea@sla.tu-darmstadt.de](mailto:ctropea@sla.tu-darmstadt.de)  
[www.sla.tu-darmstadt.de](http://www.sla.tu-darmstadt.de), [www.csi.tu-darmstadt.de](http://www.csi.tu-darmstadt.de)

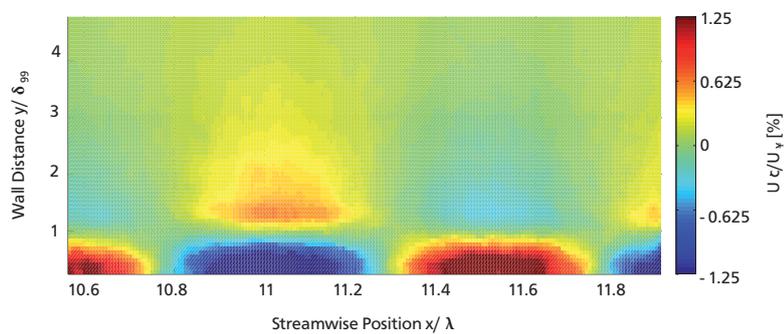
wachsen und schließlich doch die Transition herbeiführen. Aber auch solch eine Verzögerung kann signifikante Reibungsreduktionen erzielen. Seit einigen Jahren beschäftigt sich die Forschung am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der Technischen Universität Darmstadt sowie am Exzellenz Cluster Center of Smart Interfaces mit der Auslöschung von Tollmien-Schlichting Wellen unter Verwendung von Plasma-Aktuatoren. Anhand von Experimenten und Simulationen konnte gezeigt werden, dass Plasma-Aktuatoren die Wellen dämpfen und so die Transition stromabwärts verschieben können.

#### Versuchsaufbau

Um die Wirkungsweise von Plasma-Aktuatoren verstehen und optimieren zu können, sind Windkanal-experimente unerlässlich. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Platte, die parallel zur Strömung im Windkanal angebracht ist. Die Tollmien-Schlichting Wellen werden zunächst durch kleine Störquellen künstlich erzeugt, um kontrollierte und bekannte Rahmenbedingungen für das Experiment zu schaffen. Ein Plasma-Aktuator 100 mm weiter stromabwärts erzeugt die zeitlich veränderliche Volumenkraft, die die Tollmien-Schlichting Wellen auslöschen soll. Durch Änderung der Spannung an

**Abbildung 1**

Experimentell gemessene Geschwindigkeitsschwankungen in einer Grenzschicht als Folge von Tollmien-Schlichting Wellen.



den Elektroden kann man den Kraftbetrag variieren und damit sehr gezielt die Strömung beeinflussen. Zwei Geschwindigkeitssensoren messen jeweils vor und hinter dem Aktuator die Geschwindigkeiten der Strömung über der Platte. Die Tollmien-Schlichting Wellen sind als charakteristische Geschwindigkeitsfluktuationen in den Signalen beider Sensoren enthalten.

#### Hardware-in-the-Loop

Es ist nun möglich, die Auswirkung der Steuergrößen des Plasma-Aktuators anhand der Sensormesssignale zu beurteilen und die Ansteuerung des Plasma-Aktuators zu optimieren. Durch Auswertung der Amplituden vor und nach dem Ak-

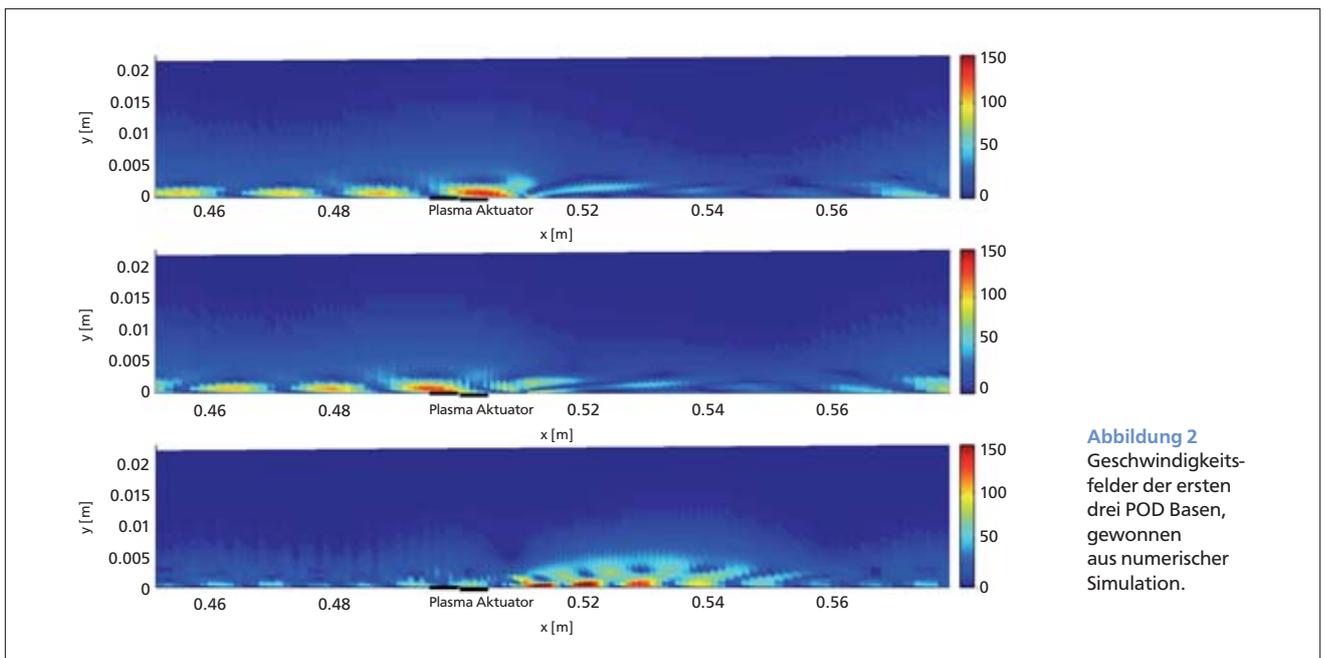
tuator kann die Welle zunächst erfasst und das Dämpfungsergebnis bewertet werden.

Wird die Wellenamplitude durch den Aktuator verringert, geschieht die Transition weiter stromabwärts. Durch eine gezielte Änderung der Steuerungsparameter soll nun in wenigen Schritten eine möglichst kleine Amplitude erzielt werden. Anhand der Größe der Amplitude wird ermittelt, ob der letzte Optimierungsschritt eine Verbesserung im Sinne der Auslöschung der Tollmien-Schlichting Wellen gebracht hat oder nicht. So entsteht ein geschlossener Kontrollkreislauf.

Für die effiziente Optimierung der Steuerungsparameter des Aktuators wurden zwei aus der Literatur bekannte Optimierungsmethoden implementiert. Beide haben zum Ziel, eine gegebene Input-Output-Abbildung (Zielfunktion) zu minimieren, also den Input zu finden, der den kleinsten Output liefert. Im vorliegenden Fall stellen die Steuerungsparameter des Aktuators den Input und die gemessene Wellenamplitude den Output dar. Die erste Methode bestimmt das lokale Minimum der Zielfunktion, indem die Funktionswerte an den Ecken eines Simplex verglichen werden und eine Ecke des Simplex gezielt durch einen anderen Punkt ersetzt wird. Das zweite Verfahren baut anhand der bisher gemachten Auswertungen der Zielfunktion ein quadratisches Modell auf, das auf einem Vertrauensbereich (Trust-Region)

#### Plasma-Aktuator

Plasma-Aktuatoren ionisieren durch ein starkes elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden die Luft, wodurch ein schwach ionisiertes Plasma entsteht. Diese elektrisch nicht neutralen Teilchen erfahren im selben elektrischen Feld eine Kraft, die sie beschleunigt. Durch Kollisionen mit den neutralen Luftmolekülen wird der Impuls des Plasmas auf die Luft übertragen. So entsteht eine Volumenkraft in der Luft über dem Plasma-Aktuator.



**Abbildung 2**  
Geschwindigkeitsfelder der ersten drei POD Basen, gewonnen aus numerischer Simulation.

minimiert wird, um einen verbesserten Input zu finden.

Es konnte in Strömungssimulationen und auch im Experiment gezeigt werden, dass der entwickelte Kontrollkreislauf effizient funktioniert und eine Optimierung der Betriebsparameter des Plasma-Aktuators ermöglicht, so dass eine deutliche Verringerung der Tollmien-Schlichting Wellenamplitude in der Grenzschicht realisiert werden kann.

### Modellprädiktive Regelung

Eine andere Variante wird derzeit an der Graduiertenschule Computational Engineering in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Nichtlineare Optimierung entwickelt. Die Idee besteht darin, den Regler anhand eines rechnerbasierten Modells „ausprobieren“ zu lassen, wie sich zukünftige Änderungen der verfügbaren Stellgrößen auf die Tollmien-Schlichting Wellen auswirken. Mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens wird dann die beste Strategie ausgewählt.

Diese Arbeitsweise ist mit der eines Schachcomputers vergleichbar: es werden verschiedene Kombinationen von zukünftigen Zügen ausprobiert und



**Jane Ghiglieri** erforscht die optimale Grenzschichtbeeinflussung mit Plasma-Aktuatoren auf Basis von reduzierten Modellen an der Graduate School Computational Engineering.



**Sven Grundmann** arbeitet am Center of Smart Interfaces als Arbeitsgruppenleiter im Bereich Drag and Circulation Control.



**Cameron Tropea** ist Professor für Strömungslehre und Aerodynamik und leitet seit 2007 das Center of Smart Interfaces.



**Stefan Ulbrich** leitet das Fachgebiet Nichtlineare Optimierung am Fachbereich Mathematik und ist Principal Investigator an der Graduate School Computational Engineering.

entsprechend ihrer Wirkung bewertet. In jedem Schritt wird dann der Zug gewählt, der zum besten erwarteten Ergebnis führt.

Der Schachcomputer Deep Blue, der 1997 Garri Kasparov besiegte, war in der Lage mehr als 200 Billionen Züge in den für jeden Zug erlaubten drei Minuten zu berechnen. Nun ist die Schach-Aufgabe ein einfacheres Problem als eine Strömung zu kontrollieren. Letzteres ist ein komplexeres Optimierungsproblem, bei dem die Wirkungen aller Kontrollaktionen mit dem hochdimensionalen, nichtlinearen Strömungsvorgang verbunden sind, der von den Navier-Stokes Gleichungen beschrieben wird.

#### Reduziertes Modell

Die wiederholte Vorhersage, wie die Strömung in der Zukunft aussieht, ist wegen der Größe des Problems mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden. Um Rechenzeit einzusparen werden reduzierte Modelle benutzt. Diese sollen eine qualitative Beschreibung der wichtigsten Strömungseigenschaften liefern, während sie eine effiziente numerische Lösung erlauben.

Eine Möglichkeit ein reduziertes Modell zu erhalten, ist die Verwendung von Proper Orthogonal Decomposition (POD). Dabei wird aus einem Simulationsdatensatz eine bestimmte

ANZEIGE



## Überzeugungstäter gesucht!

Wir suchen regelmäßig Studentinnen und Studenten, die uns im Rahmen eines Praktikums, einer Abschlussarbeit oder einer Werkstudententätigkeit unterstützen.

Mehr Infos zur Bewerbung und zu aktuellen Stellenausschreibungen unter [www.hse.ag](http://www.hse.ag).

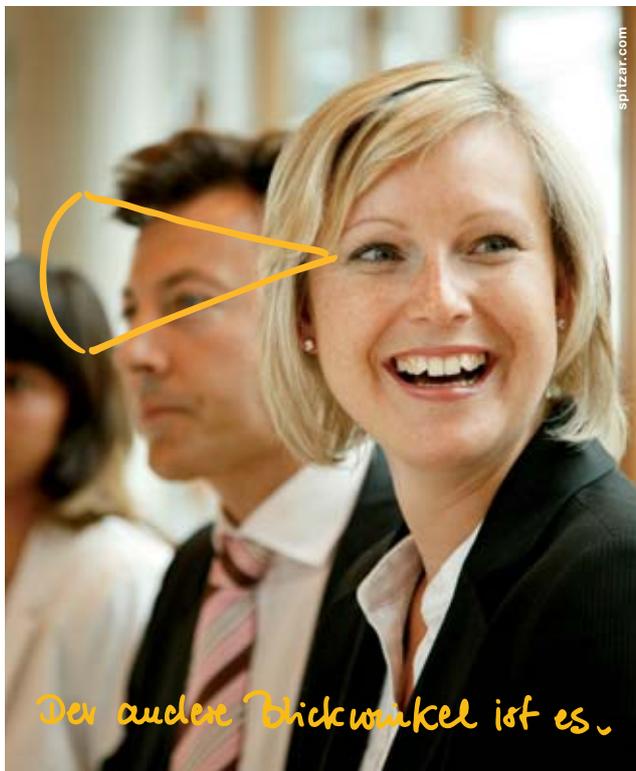
Zahl von Basisfunktionen extrahiert, auf die die Navier-Stokes Gleichungen projiziert werden. Damit werden die Navier-Stokes Gleichungen auf ein endlichdimensionales System von Gleichungen reduziert. Ist die Dimension dieses Systems klein genug, kann die Lösung mit viel weniger Rechenaufwand gefunden werden.

Das reduzierte Modell berücksichtigt näherungsweise die hinter der Input-Output-Abbildung liegende Physik und erlaubt dem Optimierungsverfahren, die optimierten Betriebsparameter des Plasma-Aktuators schnell mit ableitungsbasierten Methoden zu finden.

### Fernziele

Die vorgestellten Optimierungsmethoden werden in numerischen Simulationen entwickelt und getestet. Erst danach werden sie auch im Windkanal im laufenden Experiment ausprobiert. Während die derzeitigen Untersuchungen noch bei niedrigen Geschwindigkeiten ausgeführt werden, ist das Ziel die Strömungsgeschwindigkeit schrittweise zu erhöhen, denn das Fernziel ist eine Anwendung der Plasma-Aktuatoren in Flugversuchen auf dem universitätseigenen Experimentalflugzeug. Mit einer optimierter Anwendung kann die Luftreibung über den Tragflügeln verringert und so Treibstoff eingespart werden.

ANZEIGE



Die perfekte Location für erfolgreiche Seminare und Workshops.

Tel +49 (0)69 696 13 9100  
www.lufthansa-seeheim.de

 **Lufthansa  
Seeheim**

## Wissen freisetzen. Mit Energie.

> [www.enbw.com/karriere](http://www.enbw.com/karriere)

Talent verdient das passende Umfeld:  
Ob **Praktikum**, **Werkstudententätigkeit**  
oder **Abschlussarbeit** – bei der EnBW  
können Sie bereits im Studium an  
Herausforderungen wachsen.  
Bringen auch Sie Ihr Wissen ein,  
und arbeiten Sie gemeinsam mit uns  
an der Energie der Zukunft!

Überzeugen Sie sich von der Vielfalt  
der EnBW unter  
[www.enbw.com/karriere](http://www.enbw.com/karriere)

**top** 2011  
ARBEITGEBER DEUTSCHLAND  
AWARDED BY THE CRI INSTITUTE

**FAIR  
COMPANY**  
AN DER UNIVERSITÄT  
DARMSTADT  
karriere.de

**EnBW**

Energie  
braucht Impulse

# Direkte Numerische Simulation der Turbulenz

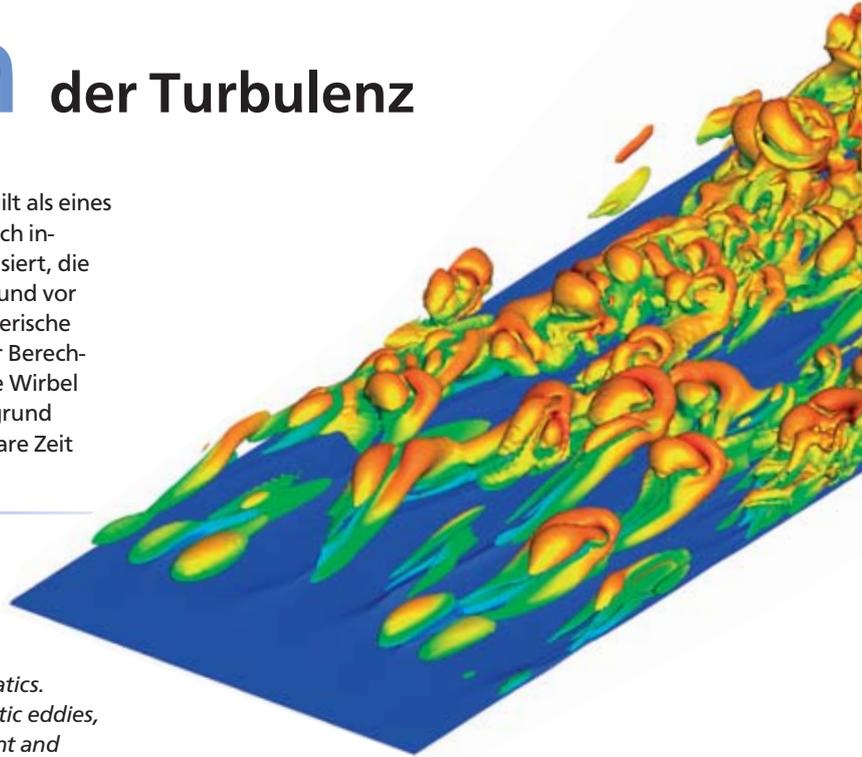
Turbulenz, also die Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen, gilt als eines der sieben Millennium-Probleme der Mathematik. Sie ist durch instationäre, dreidimensionale und zufällige Wirbel charakterisiert, die sowohl räumlich als auch zeitlich auf sehr unterschiedlichen und vor allem auch sehr kleinen Skalen stattfinden. Die Direkte Numerische Simulation (DNS) ist die genaueste numerische Methode zur Berechnung turbulente Strömungen, wobei kleinskalige turbulente Wirbel numerisch in Raum und Zeit aufgelöst werden müssen. Aufgrund ihres extremen Rechenaufwands findet die DNS auf absehbare Zeit hauptsächlich in der Grundlagenforschung Verwendung.

## ► Direct Numerical Simulation of Turbulence

*Turbulence, i.e. the solution of the Navier-Stokes equations, is considered one of the seven Millennium problems of mathematics. It is characterized by unsteady, three-dimensional and stochastic eddies, which take place both temporally and spatially on very different and particularly also on very small scales. The direct numerical simulation (DNS) is the most accurate numerical method for simulating turbulent flows, where small-scale turbulent eddies must be solved numerically in space and time. Due to its extreme cost of computation the DNS is mainly applied to the fundamental research in the foreseeable future.*

**Martin Oberlack, George Khujadze, Victor Avsarkisov, Yongqi Wang** • Turbulenz gilt als eines der letzten ungelösten Rätsel klassischer Physik und ist eines der sieben Millennium-Probleme in der Mathematik. Bei der Turbulenz handelt es sich um ein weit verbreitetes Naturphänomen, das heute noch in vielfacher Hinsicht unverstanden ist. Ihr ausgeprägt chaotischer, instationärer und dreidimensionaler Charakter tragen zu einem großen Teil hierzu bei.

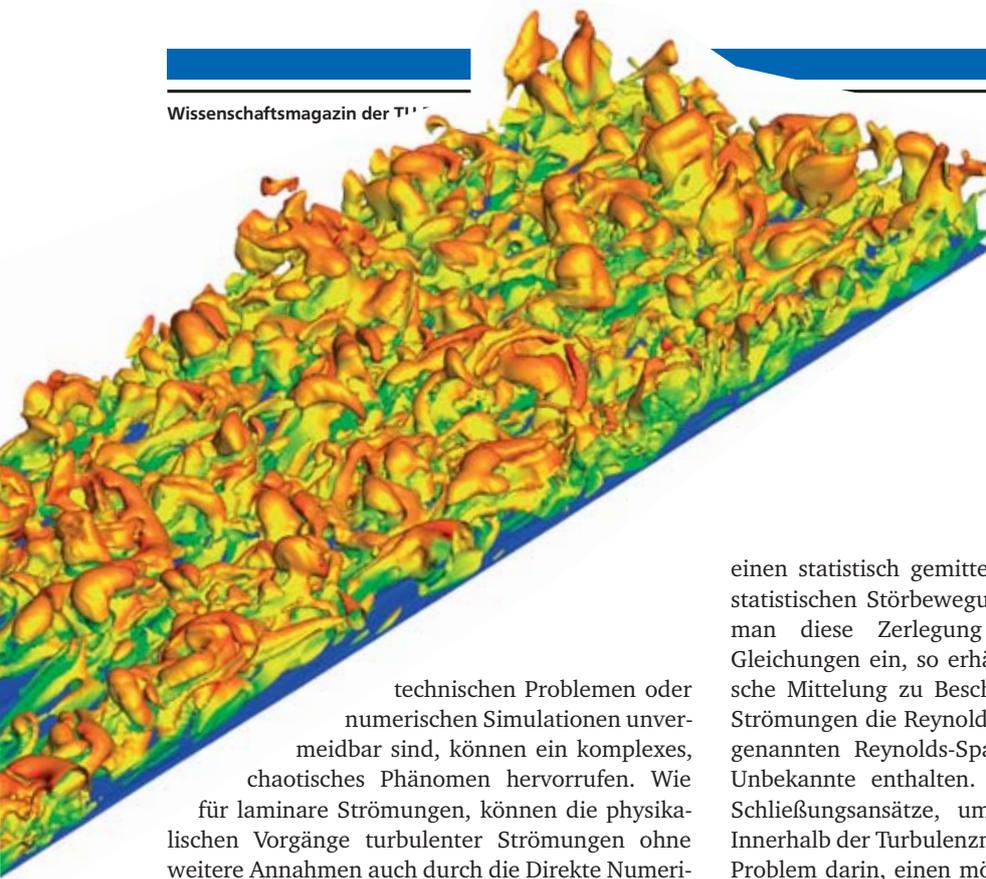
Im Jahr 1883 hat Reynolds durch einen Farbfadenversuch in einer Rohrleitung demonstriert, dass die regelmäßige und schichtenförmige, also laminare Strömung, mit zunehmender Durchströmungsgeschwindigkeit nicht mehr bestehen bleibt und sich eine chaotische turbulente Strömung bildet. Der laminar-turbulente Strömungsumschlag hängt von dem Verhältnis von Trägheits- und Reibungskräften ab, später als Reynoldszahl bezeichnet. Turbulenz kann dann existieren, wenn viskose Dämpfung nicht ausreicht, um die kinetische Energie allfälliger Wirbel zu dämpfen.



Turbulenz tritt in vielen Bereichen der Natur und Technik auf, in der Geo- und Astrophysik, in der Meteorologie sowie der Aerodynamik, aber auch in technischen Apparaten und Maschinen sowie teilweise in biologischen Systemen. Turbulente Strömungen sind im Gegensatz zu laminaren Strömungen durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Turbulente Strömungen sind instationär und dreidimensional, ihre Geschwindigkeiten enthalten fluktuierende Komponenten, die zufällig verteilt erscheinen, damit ist ihre raumzeitliche Struktur ungeordnet und schwer vorhersagbar.
- Sie enthalten Wirbel mit einem breiten Spektrum an Größenskalen: nach oben sind sie nur durch die Abmessungen der Strömungsgeometrie limitiert, nach unten durch die Skalen, auf denen die viskose Reibung dominiert.

Turbulente Strömungen werden, ebenso wie laminare Strömungen, durch die Erhaltungsgleichungen für ein fluides Kontinuum beschrieben. Weiterhin wird üblicherweise vereinfachend angenommen, dass ein Newtonsches Fluid vorliegt, damit die Impulserhaltung durch die Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben werden kann. Im Gegensatz zu laminaren Strömungen erscheinen turbulente Strömungen nahezu zufällig aufgrund ihrer empfindlichen Abhängigkeit von Anfangs- und Randbedingungen. Geringe Störungen, die in

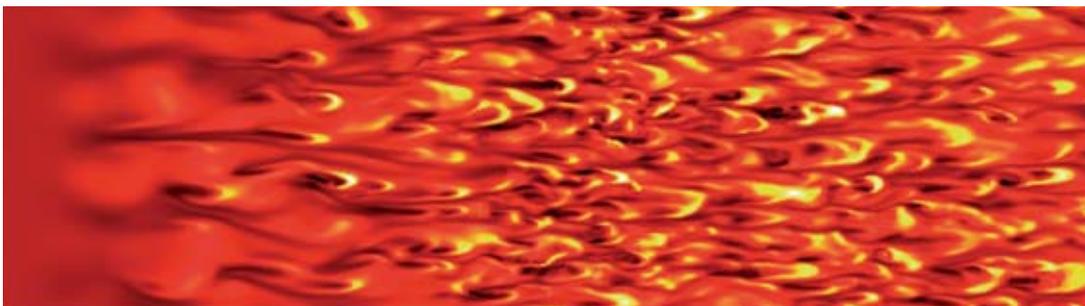


**Abbildung 1**  
Isoflächen der Vorticity  
für eine turbulente  
Grenzschichtströmung.

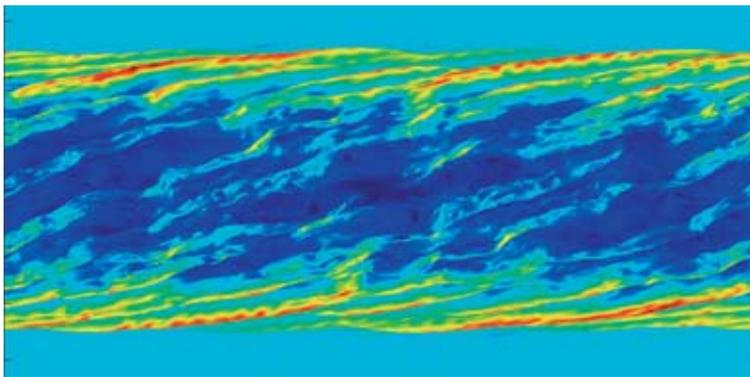
technischen Problemen oder numerischen Simulationen unvermeidbar sind, können ein komplexes, chaotisches Phänomen hervorrufen. Wie für laminare Strömungen, können die physikalischen Vorgänge turbulenter Strömungen ohne weitere Annahmen auch durch die Direkte Numerische Simulation (DNS) der vollständigen instationären Navier-Stokes-Gleichungen detailliert untersucht werden, wenn kleinskalige turbulente Schwankungen und Wirbel numerisch in Raum und Zeit numerisch aufgelöst werden. Die DNS ist die genaueste Methode, um turbulente Strömungen zu berechnen, sie stellt aber auch die höchsten Anforderungen an das numerische Verfahren sowie an die verfügbare Rechenleistung. Obwohl die Turbulenz natürlicherweise ein breites Spektrum chaotisch sich bewegender Wirbel aufweist, ist das Detailwissen der einzelnen Wirbelbewegung für die meisten technische Problemstellungen nicht relevant. Vielmehr genügt häufig das Wissen statistischer Parameter wie die mittlere Geschwindigkeit, der mittlere Druck sowie Varianzen. Dank der kohärenten Strukturen in der Turbulenz sind die statistisch gemittelten Felder also im mathematischen Sinne nicht zufällig und damit in gewissem Sinne vorhersagbar. Es bestehen unterschiedliche Strategien, um die mittleren Felder turbulenter Strömungen ohne Verwendung der DNS zu simulieren, um den Rechenaufwand zu verringern. Zu diesem Zweck unterteilt man die Feldgrößen wie die Geschwindigkeit und den Druck in

einen statistisch gemittelten Term, der von einer statistischen Störbewegung überlagert wird. Setzt man diese Zerlegung in die Navier-Stokes-Gleichungen ein, so erhält man durch die statistische Mittelung zu Beschreibung von turbulenten Strömungen die Reynolds-Gleichungen, die die sogenannten Reynolds-Spannungen als zusätzliche Unbekannte enthalten. Man benötigt deswegen Schließungsansätze, um das System zu lösen. Innerhalb der Turbulenzmodelle besteht das größte Problem darin, einen möglichst universellen semiempirischen Schließungsansatz zu finden. Unterschiedliche Schließungsansätze haben zu verschiedenen Turbulenzmodellen geführt. Zur Validierung dienen Daten aus Experimenten und eben der DNS. Anstelle der statistischen Mittelung tritt bei der Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation, LES) eine zeitliche und räumliche Tiefpassfilterung. Dies hat zur Folge, dass sich die großen Wirbelstrukturen direkt berechnen lassen, während die kleinskaligen Phänomene weiterhin modelliert werden müssen. Die LES verspricht bei höherem Rechenaufwand eine bessere Beschreibung der Turbulenz als die statistischen Methoden, weil zumindest ein Teil der turbulenten Schwankungen wiedergegeben wird.

Die rasante Entwicklung im Bereich der Großrechneranlagen (Super-Computer) lässt die Tendenz in der Strömungsmechanik erkennen, in Zukunft verstärkt die Navier-Stokes-Gleichungen ohne jegliche Vereinfachung direkt numerisch zu lösen. Da Turbulenz sowohl räumlich als auch zeitlich auf sehr unterschiedlichen und vor allem auch sehr kleinen Skalen stattfindet, werden zur korrekten Auflösung aller Phänomene extrem feine Gitter und Zeitschritte benötigt. Ein großer Anwendungs-



**Abbildung 2**  
Draufsicht der  
Isolinien der Vorticity  
für eine turbulente  
Grenzschicht-  
strömung.



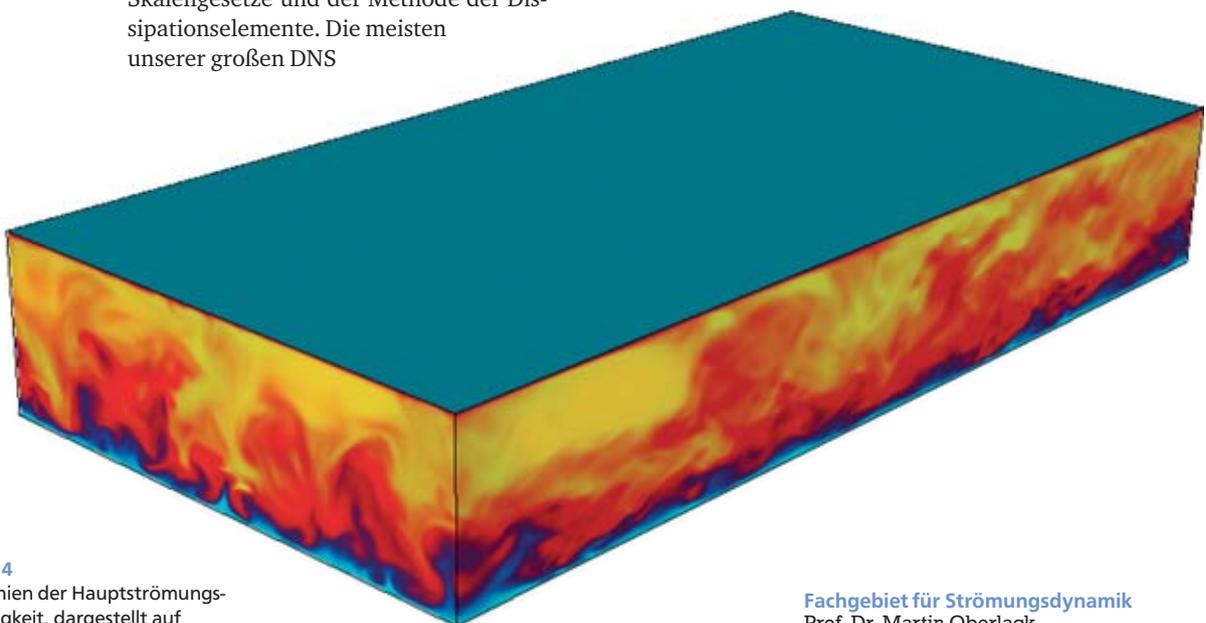
**Abbildung 3**  
Isokonturlinien der Dichteveriation bei der Ausbreitung einer durch eine Turbulenz erzeugten Schallwelle in der Scherströmung.

bereich der DNS ist der laminar-turbulente Umschlag. Des Weiteren wird die DNS in den Bereichen Ablöseblasen, vollturbulente Strömungen und Aeroakustik eingesetzt und dient auch der Weiterentwicklung von Turbulenzmodellen.

Neben der DNS turbulenter Strömungen beschäftigt sich das Fachgebiet für Strömungsdynamik im Fachbereich Maschinenbau auch mit der Turbulenzmodellierung mit Hilfe turbulenter Skalengesetze und der Methode der Dissipationselemente. Die meisten unserer großen DNS

Simulationen sind auf den massiv parallelen Supercomputern am Leibniz-Rechenzentrum in München sowie am Jülich Supercomputing Centre durchgeführt worden, die zu den leistungsfähigsten Rechnern in Europa gehören. Beispiele hinsichtlich Grenzschichtströmung, aeroakustischer Wellen in einer Scherströmung sowie Kanalströmung mit Transpiration werden im Folgenden aufgeführt.

Eine ebene turbulente Grenzschicht für eine längs angeströmte ebene Platte wurde durch die DNS mit einer Auflösung von 270 Millionen Gitterpunkten durchgeführt. Die Isoflächen der Vorticity-Komponente in der Hauptströmungsrichtung und ihre Draufsicht sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Der Übergang laminar-turbulent lässt sich erkennen. In der Nähe der Plattenvorderkante ist die Grenzschicht zunächst stets laminar. Dann entstehen die Wirbel unregelmäßig an beliebigen Stellen der Grenzschicht, zerfallen und wandern stromabwärts, bis vollturbulente Strömung gebildet wird. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, tritt der Übergang durch ein starkes Anwachsen der Grenzschichtdicke in Erscheinung.



**Abbildung 4**  
Isokonturlinien der Hauptströmungsgeschwindigkeit, dargestellt auf den Außenflächen des Rechengitters für eine turbulente Kanalströmung mit Transpiration.

Die aerodynamische Schallerzeugung durch eine Turbulenz in einer Scherströmung und ihre Ausbreitung wurde auch durch die DNS untersucht. Der Schall wird anfänglich durch turbulente Schwankungen in der Mitte der Scherströmung erregt und breitet sich seitlich aus, wie aus der Dichteveriation für einen gegebenen Zeitpunkt in Abbildung 3 zu sehen ist. Der Einfluss der starken Scherströmung auf der Turbulenzstruktur ist deutlich zu erkennen. Absaugen/Ausblasen ist ein wichtiges Verfahren zur aktiven Grenzschicht- und Strömungskontrolle. Als Beispiel wurde eine turbulente Kanalströmung mit Transpiration durch die DNS simuliert. Wie an den Isokonturlinien der Hauptströmungsgeschwindigkeit (Abbildung 4) erkennbar, verstärkt sich die Turbulenz auf der unteren Seite mit Ausblasen, und verringert sich die Turbulenz auf der oberen Seite durch die Absaugung. Noch ist nicht gelungen, Turbulente Strömungen für praktische Probleme exakt zu berechnen. Super Computing turbulenter Strömungen bleibt somit auch weiterhin als ein aktuelles und hochspannendes Forschungsthema.



**Martin Oberlack** ist Professor und Leiter des Fachgebiets für Strömungsdynamik (FDY) an der TU Darmstadt und Principal Investigator an der Graduate School CE. Seine Forschungsschwerpunkte sind Strömungsmechanik und Turbulenzmodellierung.



**George Khujadze** ist Postdoktorand am FDY und arbeitet auf Gebieten der DNS, Stabilitätsanalyse.



**Victor Avsarkisov** ist Doktorand am FDY und beschäftigt sich mit der DNS der Turbulenz



**Yongqi Wang** ist Privatdozent und stellvertretender Fachgebietsleiter am FDY. Seine Forschungsschwerpunkte sind Kontinuumsmechanik, Mehrphasenströmung.

## LIFE - Gründerzentrum Wiesbaden



In Wiesbaden, im Industriepark Kalle-Albert, ist für Start-up- Firmen und Existenzgründer eine Anmietung von Labor- und Büroflächen zu günstigen Konditionen möglich!

Das Gründerzentrum LIFE bietet Ihnen neben den bezugsfertigen Räumlichkeiten auch Existenzgründerhilfen, Experten in Genehmigungs- und Umweltfragen, Dienstleistungen und Services bis hin zum Personalmanagement.

Beste Verkehrsanbindungen in unmittelbarer Nähe erreichbar:

- Autobahn: 3 Minuten
- Flughafen Frankfurt: 20 Minuten
- S-Bahn am Gelände

Unsere Konditionen\* für Ihren Start:

- Im ersten Mietjahr:
  - 6,00 EUR/m<sup>2</sup> und Monat  
Büromietfläche
  - 8,00 EUR/m<sup>2</sup> und Monat  
Labormietfläche
  - 10,00 EUR/MA und Monat  
Kosten für Umlagen

für mehr Informationen  
rufen Sie uns an!

InfraServ GmbH & Co. Wiesbaden KG  
Oliver Heinrich  
Tel.: 0611-962-6547  
E-Mail: [oliver.heinrich@infraserv-wi.de](mailto:oliver.heinrich@infraserv-wi.de)  
[www.kalle-albert.de](http://www.kalle-albert.de)

**Industriepark**  
KALLE-ALBERT

\* zzgl. den gebäudespezifischen Nebenkosten, Energie-Verbrauchskosten, sowie der jeweils gültigen gesetzlichen Mehrwertsteuer

# Simulation

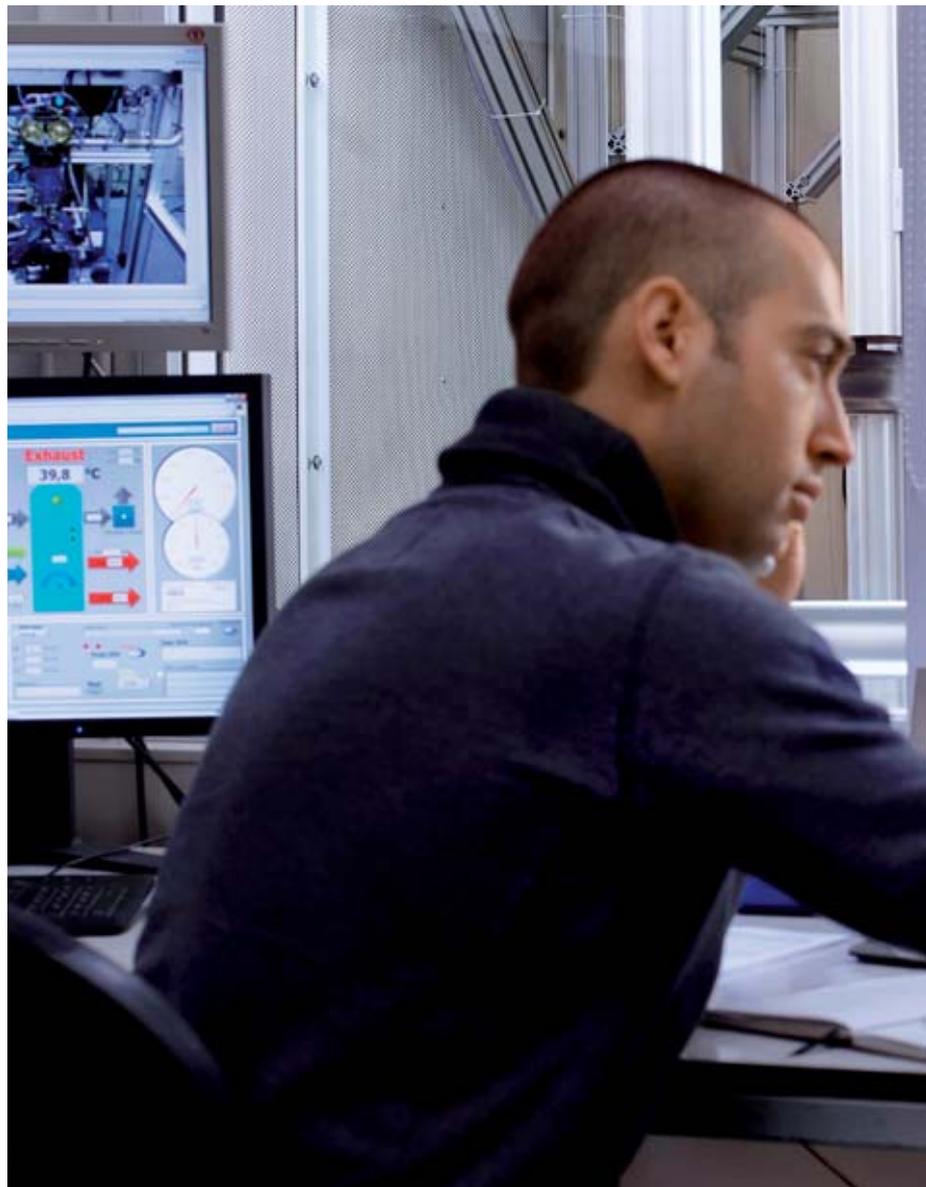
## technischer Verbrennungsprozesse

Simulationen am Rechner geben detaillierte Einblicke in Verbrennungsprozesse. Sie werden daher immer häufiger in der Entwicklung von technischen Verbrennungssystemen, wie Motoren oder Gasturbinen, eingesetzt. Sie zeigen Möglichkeiten zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs, aber auch Ursachen von Schadstoffemissionen, auf. Aufgrund eines komplexen Zusammenspiels zwischen Strömungsmechanik, chemischer Reaktion, Wärme- und Stofftransport sind Simulationen noch sehr zeitaufwändig. Ziel ist es, den Rechenaufwand zu minimieren und dabei das Verhalten von Verbrennungssystemen zuverlässig vorherzusagen.

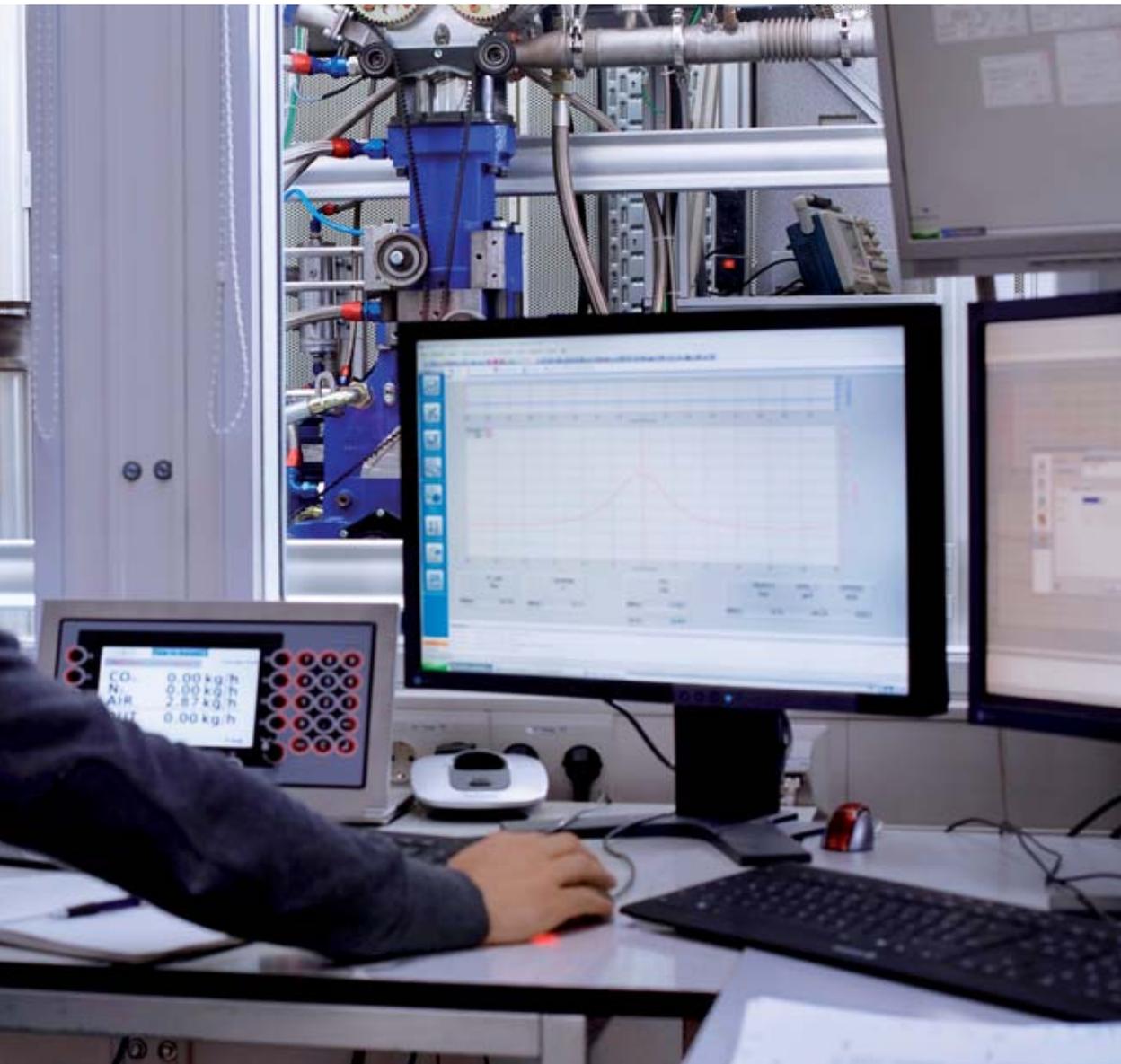
### ► *Simulation of Technical Combustion Processes*

*Computational simulations give detailed insights into combustion processes. They are increasingly used in the development process of technical combustors, as for example engines or gas turbines. Their results can be used to optimize fuel consumption and to identify causes of pollutant emissions. Simulations of combustion processes are very time consuming due to the complex interaction of flow dynamics, chemical reaction, heat- and mass transfer. The aim is to reduce computational costs while maintaining a reliable prediction of the combustion systems behavior.*

**Michael Baumann, Mouldi Chrigui, Benjamin Böhm, Johannes Janicka** • Energie aus technischen Verbrennungssystemen prägt unsere Gesellschaft. Ob Mobilität, Kommunikation, Nahrung, Wärme oder Konsumgüter; das heutige Leben ist ohne Energie unvorstellbar. Wachsende Mobilität und immer umfassendere Kommunikationstechnologien haben zu einer weltweiten Vernetzung in allen Lebensbereichen und damit zu einer weiter steigenden Abhängigkeit von Energie geführt. Mindestens 80 % des weltweiten Energieverbrauchs wird derzeit durch Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Verfügung gestellt. Die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes wird in Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder Brenn-



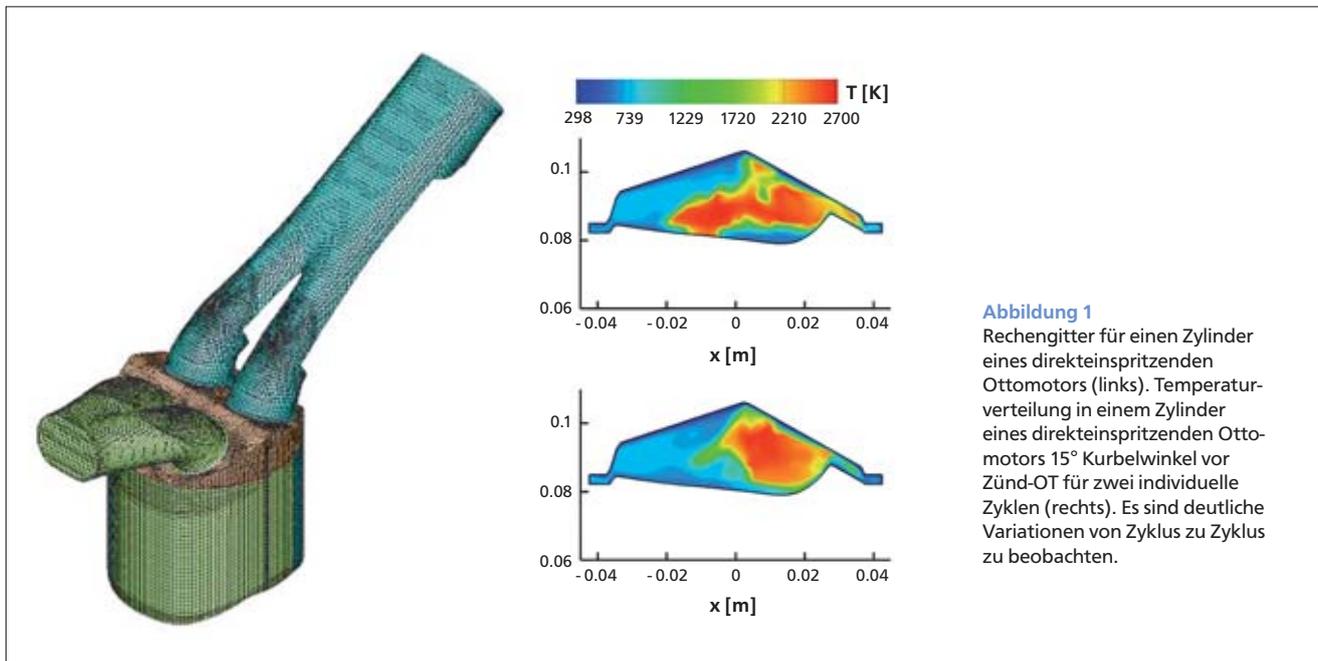
kammern in nutzbare Energie gewandelt. Das Ziel aktueller Forschungsarbeiten ist es daher, die Effizienz dieser Verbrennungssysteme zu verbessern und gleichzeitig den Schadstoffausstoß zu verringern. Dafür müssen die zugrunde liegenden technischen Prozesse ausreichend genau be-



Prüfstand mit einem optisch zugänglichen Forschungsmotor. Arbeiten an Prüfständen erfordern einen enormen Aufwand hinsichtlich Infrastruktur, Personal, Messtechnik und Prototypen.

geschrieben werden, um das Verhalten neuer Systeme zuverlässig vorherzusagen. Aufgrund der Verfügbarkeit von modernen Rechnern, deren Leistungsfähigkeit stetig zunimmt, ist der Einsatz von numerischen Simulationen zunehmend eine günstige und schnelle Alternative zum

Experiment. Entwicklungsarbeiten werden somit nicht mehr auf dem Prüfstand am realen Verbrennungssystem, sondern am Rechner durchgeführt. Um eine Simulation dieser Verbrennungsprozesse durchführen zu können, sind umfangreiche theoretische Kenntnisse aus den unterschiedlichen

**Abbildung 1**

Rechengitter für einen Zylinder eines direktinspritzenden Ottomotors (links). Temperaturverteilung in einem Zylinder eines direktinspritzenden Ottomotors 15° Kurbelwinkel vor Zünd-OT für zwei individuelle Zyklen (rechts). Es sind deutliche Variationen von Zyklus zu Zyklus zu beobachten.



**Dipl.-Ing. Michael Baumann** ist Doktorand am Fachgebiet Energie- und Kraftwerkstechnik an der TU Darmstadt. Er arbeitet auf dem Gebiet der numerischen Simulation von Motoren.



**Dr.-Ing. Mouldi Chrigui** ist Post Doc am Fachgebiet Energie und Kraftwerkstechnik der TU Darmstadt. Er arbeitet auf dem Gebiet der Modellierung von Gasturbinen und der Spray-Verbrennung.



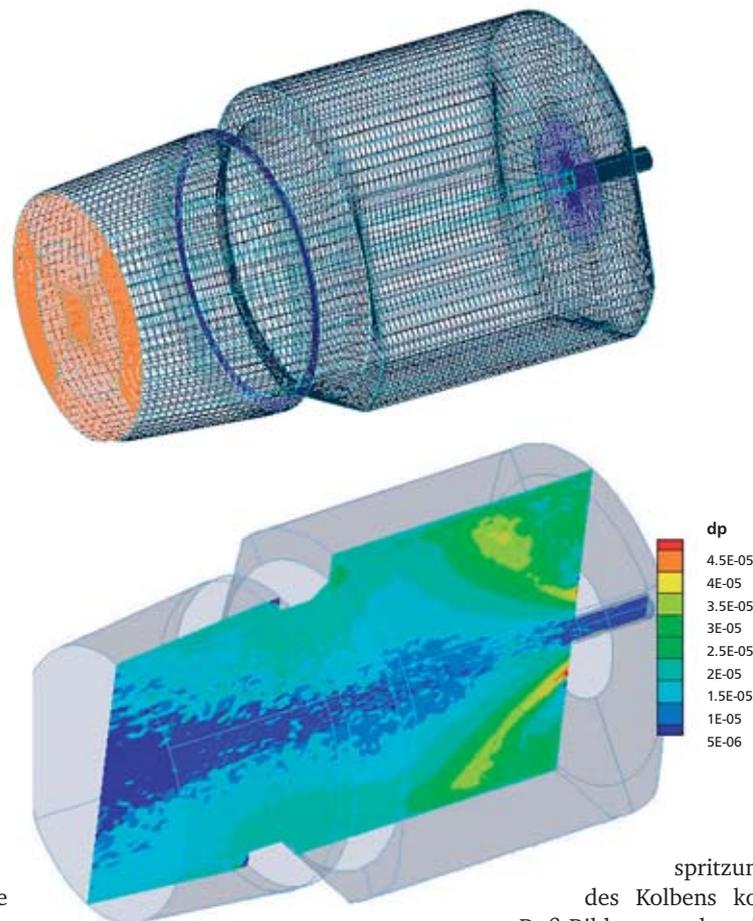
**Dr.-Ing. Benjamin Böhm** leitet als Akademischer Rat das Laserlabor des Fachgebiets Energie- und Kraftwerkstechnik an der TU Darmstadt und arbeitet auf dem Gebiet der Laserdiagnostik von Verbrennungssystemen.



**Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka** ist seit 1989 Professor im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet Energie- und Kraftwerkstechnik.

Bereichen der Chemie, Physik sowie der Mathematik erforderlich.

Der erste Schritt einer numerischen Simulation ist die genaue Definition des Systems. Es muss entschieden werden, welche Gebiete von Interesse sind, und ihre Schnittstellen zur Umgebung müssen genau definiert werden. Weiterhin müssen alle Energie- und Massenströme, die die Systemgrenzen überschreiten, genau charakterisiert werden. Dann wird ein Gitter erstellt, welches die Geometrie in kleinere Volumen unterteilt. Je nach Umfang des Problems und Form der Volumenelemente kann das generierte Gitter aus mehreren Millionen Kontrollvolumen bestehen. Der Aufwand der Gittergenerierung sollte nicht unterschätzt werden, da oft ein gutes Rechengitter der Schlüssel zum Erfolg ist. Gleichzeitig kann auch die Wahl der physikalischen und chemischen Modelle das Problem in dessen Komplexität beeinflussen. So kommt es bei der Verbrennung von einfachen Kohlenwasserstoffen wie Methan zu über 400 verschiedenen Elementarreaktionen mit mehr als 1000 Spezies, für die je eine Gleichung aufgestellt werden muss. Für reale Kraftstoffe, die aus langkettigen Kohlenwasserstoffen be-



stehen, nimmt die Komplexität deutlich zu. Die Lösung solcher Gleichungssysteme nimmt trotz heutiger Rechenleistung sehr viel Zeit und Speicherkapazität in Anspruch. Daher wird der Einfluss der einzelnen Reaktion auf das Gesamtsystem analysiert und nur die wichtigsten werden in sogenannten „reduzierten Mechanismen“ beibehalten. Das aus der Strömungsmechanik, dem Wärme- und Stofftransport und der Chemie resultierende Gleichungssystem wird dann für jedes Kontrollvolumen gelöst.

#### Direkteinspritzender Ottomotor

Bei klassischen Ottomotoren werden Kraftstoff und Luft vor dem Verbrennungsprozess zusammengeführt, sodass sich ein homogenes Gemisch einstellt. Dieser Prozess kann außerhalb des Brennraums (Saugrohreinspritzung) oder während des Ansaugtaktes im Zylinder selbst (Direkteinspritzung) stattfinden. Für die Direkteinspritzung steht im Vergleich zur Saugrohreinspritzung weniger Zeit für eine optimale Durchmischung von Kraftstoff und Luft zur Verfügung. Durch eine zu frühe Ein-

**Abbildung 2**  
Rechengitter einer Hochdruck-Brennkammer (oben). Die Verteilung der Brennstofftropfen, die Auskunft über die Güte der Durchmischung des Brennstoffs mit Luft gibt, lässt sich mit einer Simulation schön darstellen (unten).

spritzung, kann es zur Benetzung des Kolbens kommen, was eine erhöhte Ruß-Bildung und steigende HC-Emissionen zur Folge hat. Wird der Kraftstoff später eingespritzt, wird der Kolben nicht mehr benetzt. Die Kraftstofftropfen haben dann jedoch noch weniger Zeit zum Verdampfen und Mischen zur Verfügung, was zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs führt.

Die Simulation innermotorischer Verbrennung liefert detaillierte Einblicke in den Ablauf eines solchen motorischen Verbrennungsprozesses. Die Gittergenerierung, die am Beginn einer jeder Simulation steht, stellt für einen Kolbenmotor eine besondere Herausforderung dar, da die Bewegung des Kolbens und der Ventile berücksichtigt werden muss und das Rechengitter im Brennraum entsprechend dem Kurbelwinkel gestreckt bzw. gestaucht wird. Abbildung 1 zeigt das 3-dimensionale Gitter mit einer Gesamtanzahl von ca. 600.000 Kontrollvolumen.

Die Verbrennung von Kraftstofftropfen, sogenannten Sprays, wird besonders durch die Art der Einbringung und dem variierenden Strömungsfeld innerhalb des Motors beeinflusst. Um sich ein Bild



**Abbildung 3**

Die Ergebnisse von Simulationen werden am Fachgebiet parallel durch Messungen am Prüfstand auf ihre Vorhersagekraft hin überprüft. Hier wird die Verbrennung in der Hochdruckbrennkammer vermessen.

davon zu machen, wurde eine Simulation eines 4-Takt-Motors durchgeführt. Da nicht jeder Motorzyklus identisch abläuft, ist es das Ziel, die zyklischen Variationen zu erfassen und in der Entwicklung gezielt zu beeinflussen, um einen möglichst ruhigen Motorlauf zu gewährleisten. Mit der Anwendung der Grobstruktur-Simulation, die das Potential besitzt, die von Zyklus zu Zyklus variierende Strömung zu bestimmen, ist es möglich, den Verbrennungsablauf vorherzusagen. Während der Motorsimulation wurde beobachtet, wie die Temperaturverteilung und damit der Verbrennungsprozess durch das variierende Strömungsfeld beeinflusst wird. Die Flammenausbreitung, die sich anhand des Temperaturfeldes (Abbildung 1) erkennen lässt, weist einen asymmetrischen Verlauf im Brennraum auf, wobei sie bei gleichem Grad Kurbelwinkel stark voneinander abweicht.

#### **Stickoxidbildung in Gasturbinen**

Bei der Auslegung von Brennkammern kommt es nicht nur darauf an, den Kraftstoff vollständig zu verbrennen. Die Brennkammer in modernen Gasturbinen unterteilt sich vielmehr in mehrere Zonen, innerhalb derer die Verbrennungsprozesse unterschiedlich eingestellt werden, um den Schadstoffausstoß zu minimieren. Ein Konzept ist die RQL (Rich-Quench-Lean)-Brennkammer, welche heute in modernen Flugtriebwerken Einsatz findet. Diese beruht auf dem Prinzip, dass eine Flamme in drei Bereiche eingeteilt wird. Im ersten Teil der Brennkammer brennt eine Flamme mit fettem Gemisch, d.h. es steht weniger Luft zur Verfügung als zur vollständigen Verbrennung gebraucht wird. Bei der fetten Verbrennung ist die Temperatur deutlich niedriger als in einer stöchiometrischen Flamme, in der exakt so viel Luft zugeführt wird wie für die vollständige Verbrennung gebraucht wird. Dies reduziert die umweltschädlichen Stickoxide, die vermehrt bei hohen Temperaturen entstehen. Fette Verbrennung produziert jedoch Rußpartikel.

#### **Energie- und Kraftwerkstechnik**

Dipl.-Ing. Michael Baumann  
Tel. 06151/16-5186  
E-Mail: baumann@ekt.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Mouldi Chrigui  
Tel. 06151/16-2533  
E-Mail: mchrigui@ekt.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Benjamin Böhm  
Tel. 06151/16-2502  
E-Mail: bboehm@ekt.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka  
Tel. 06151/16-2157  
E-Mail: janicka@ekt.tu-darmstadt.de  
[www.ekt.tu-darmstadt.de](http://www.ekt.tu-darmstadt.de)

In der zweiten Zone der RQL-Brennkammer findet eine weitere Luftzufuhr statt. Die Durchmischung muss sehr schnell erfolgen, damit stöchiometrische Verbrennung, die hohe Temperaturen zur Folge hat, möglichst vermieden wird. Dadurch entsteht in der dritten Zone eine magere Flamme, die wiederum geringe Temperatur aufweist. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Rußpartikel aus der ersten Zone werden in dem letzten mageren Bereich vollständig oxidiert. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der eingebrachten Kraftstofftropfen, wie sie in einer Simulation vorhergesagt werden. Dies ermöglicht, die Durchmischung des Kraft-

stoffes mit der Luft zu charakterisieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um die Ausbildung der oben beschriebenen Zonen gezielt einzustellen. Um die Vorhersagegüte der Simulation Tools, die am Fachgebiet ständig weiterentwickelt werden, zu überprüfen, werden parallel Experiment durchgeführt (Abbildung 3). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Simulationen viele Phänomene von Verbrennungsprozessen darstellen können. Es muss aber noch an Modellen gearbeitet werden, die den Rechenaufwand deutlich verringern und die Zuverlässigkeit der Vorhersage verbessern.

ANZEIGE



schenckprocess



## Wir wissen doch alle, dass die inneren Werte die wichtigsten sind.

Was Sie hier sehen, können Sie normalerweise nicht sehen, aber spüren.

So ist diese patentierte und weltweit einzigartige Räumsscheibe dafür verantwortlich, dass z. B. bei der Herstellung von Medikamenten selbst 20 g in der Stunde hochgenau dosiert werden. Damit die Tablette auch so wirkt, wie sie soll.

Unsere Technik kommt aber auch zum Einsatz, wenn es darum geht, die richtige Menge Gurken ins Glas zu bringen, das optimale Aluminium für den Formel-1-Motor herzustellen, den richtigen Baustoff für eine aufwändige Brückenkonstruktion anzumischen oder Energie hocheffizient und umweltfreundlich zu erzeugen.

Mit 2.800 Mitarbeitern an 33 Standorten ist Schenck Process weltweit führend in allen Bereichen der Mess- und Verfahrenstechnik, im industriellen Wägen, Dosieren, Sieben und Automatisieren. Und das seit über 125 Jahren.

### Jetzt erfolgreich ins Berufsleben starten!

Ob Praktikum, Abschlussarbeit oder als Werkstudent. Wir laden Sie ein, uns bei einem Rundgang durch unsere Montage und das TestCenter oder bei einem Schnuppertag kennenzulernen. Melden Sie sich einfach an.

### Wir freuen uns auf Sie.

Schenck Process GmbH, Human Resources  
Pallaswiesenstr. 100, 64293 Darmstadt  
T +49 61 51-15 31 10 24, [humanresources@schenckprocess.com](mailto:humanresources@schenckprocess.com)

[www.schenckprocess.com](http://www.schenckprocess.com)



# Blitze im Computer

Mit Computersimulationen von elektromagnetischen Feldern kann man in einen Menschen hineinschauen, der am Steuer eines Fahrzeuges sitzt, in das ein Blitz einschlägt. Die vom Blitz verursachten Ströme im Herzmuskel werden berechnet und grafisch dargestellt. In vielen Bereichen, in denen der Mensch eine Rolle spielt, kann mit diesen Methoden der Schutz vor Gefährdungen untersucht und sichergestellt werden.

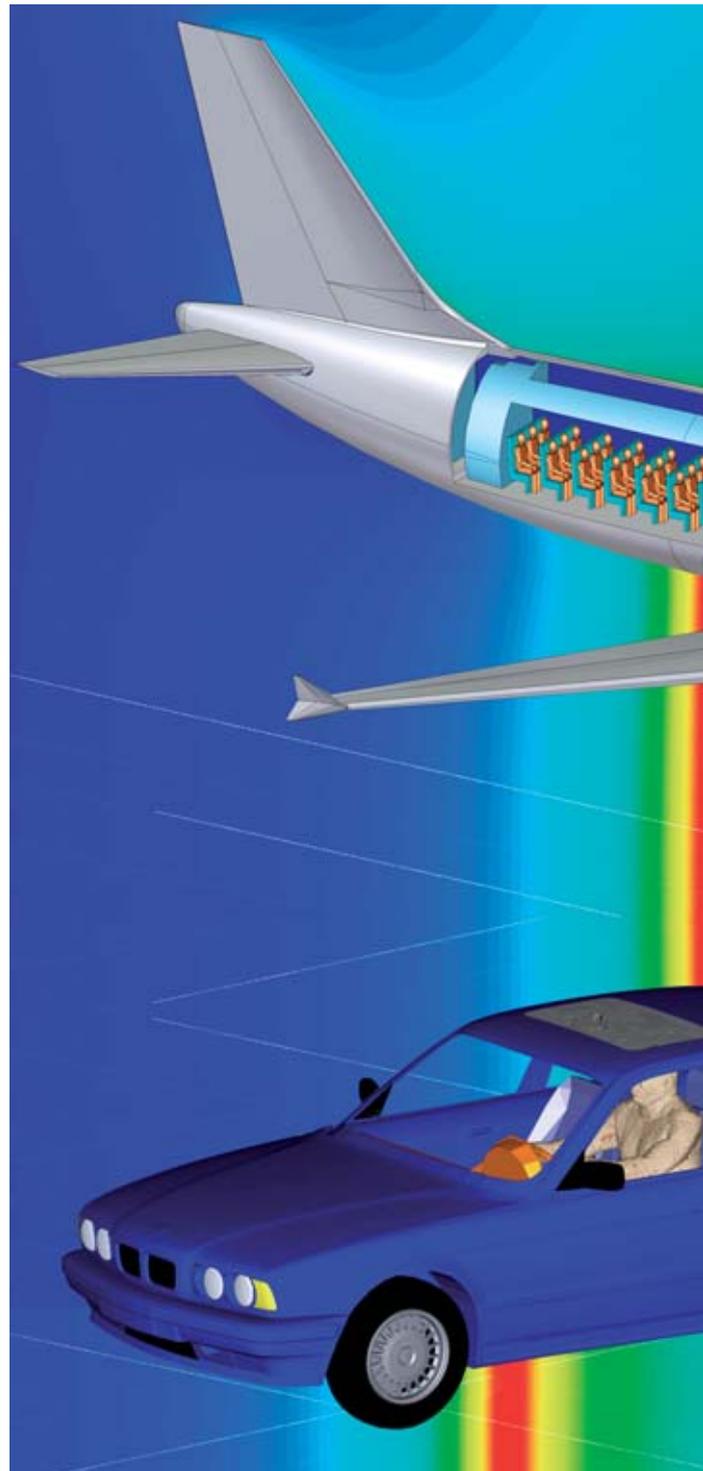
## ► Lightning in the Computer

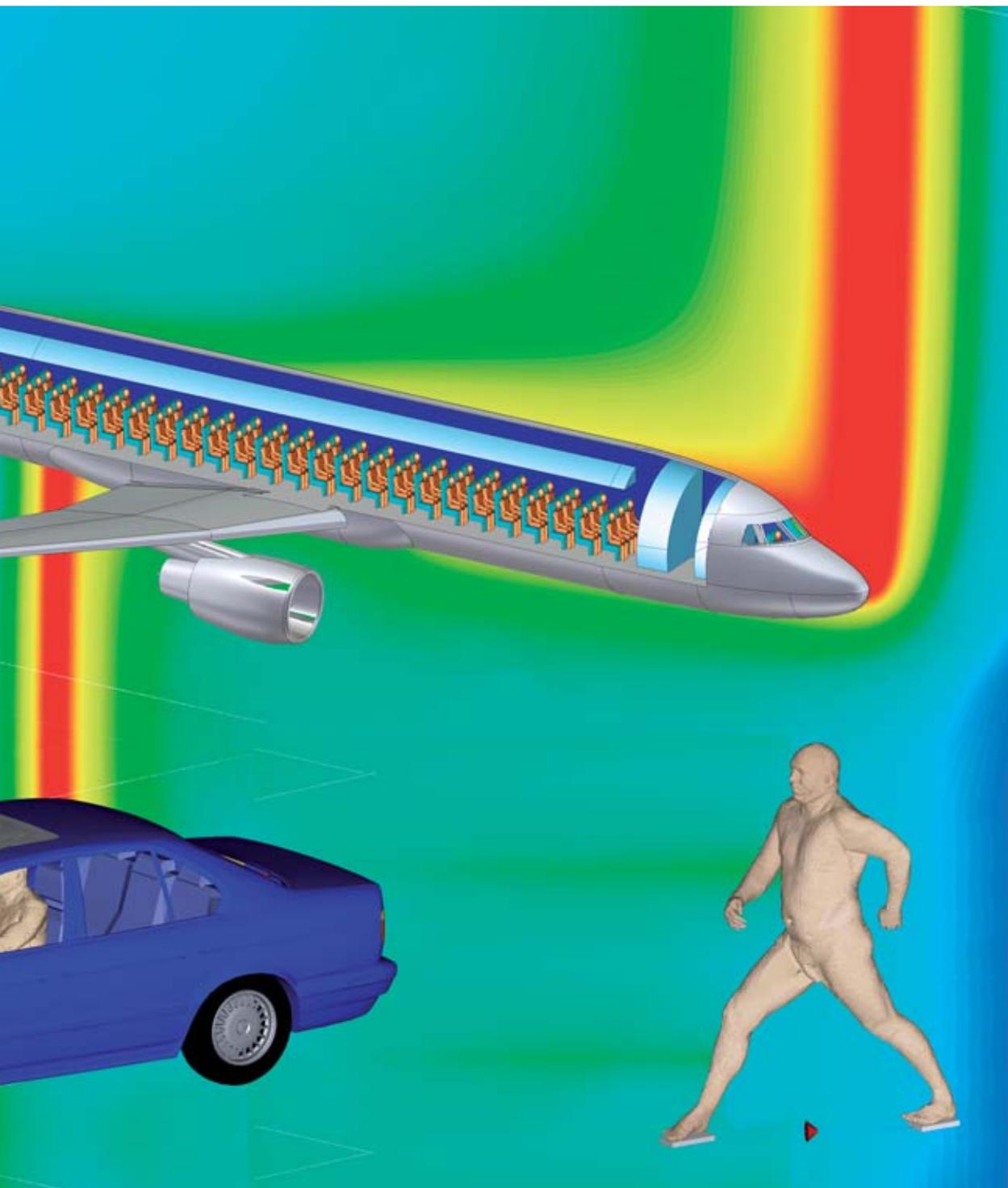
*Computer simulations of electromagnetic fields allow to look inside a human being, sitting in a car during a lightning stroke. Currents in the heart muscle caused by the lightning are calculated and graphically visualized. In many areas in which human beings are involved, personal safety can be analyzed and ensured this way.*

**Jing Gao, Stephan Koch, Irina Munteanu, Thomas Weiland** • Die Modellierung und die Simulation elektromagnetischer Problemstellungen erlangte in den letzten Jahren eine zunehmende Bedeutung. Durch Simulationen können viele praktische Versuche auf der Basis realer Prototypen vermieden werden. Auf diese Weise werden enorme Zeit- und Kosteneinsparungen im gesamten Produktentwicklungszyklus erzielt. Zusätzlich ermöglicht die Simulation auch das Verstehen von Vorgängen, die einer herkömmlichen Messung nicht zugänglich wären, beispielsweise bei der Bestimmung elektromagnetischer Felder innerhalb des (lebendigen) menschlichen Körpers.

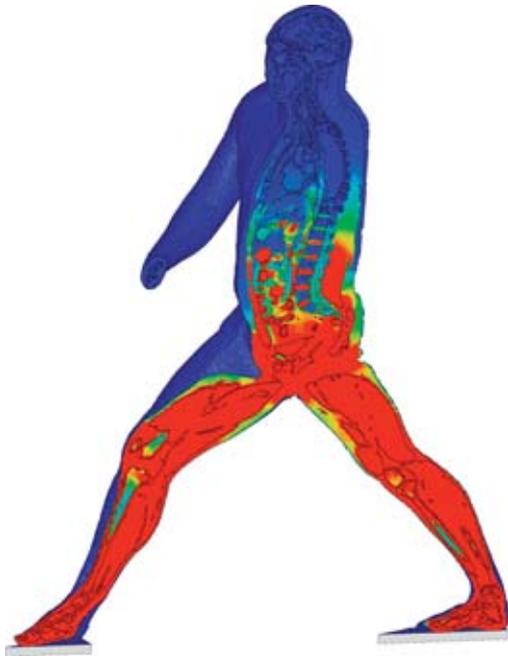
### Elektromagnetische Simulationen

Um eine elektromagnetische Simulation einer gegebenen Struktur durchzuführen, muss zunächst ein Rechengitter erstellt werden. Dabei wird das gesamte zu untersuchende Modell in kleine Untervolumen, z. B. Würfel oder Tetraeder, unterteilt, vergleichbar mit dem Nachbau eines realen Hauses aus vielen Lego-Steinen. Je feiner dieses Gitter gewählt wird, desto höher ist die zu erwartende Genauigkeit der Simulationsergebnisse, desto höher ist aber auch die Anzahl der verwendeten Untervolumen (Lego-Steine). Die spezifischen Gleichungen des Elektromagnetismus werden im nächsten Schritt in jedem dieser Untervolumen angewendet. Aus der Zusammenfassung all dieser

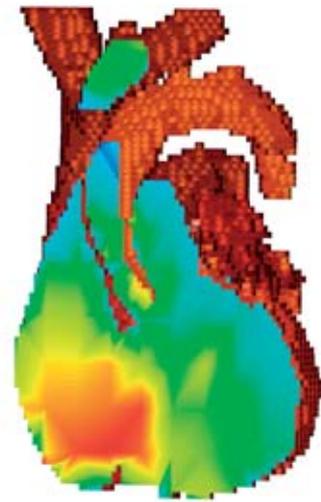




**Abbildung 1**  
Geometrie des simulierten Airbus A320 (oben); Simulationsmodell mit dem Modell eines Menschen im Fahrzeug (unten links); Modell des menschlichen Körpers für die Schrittspannungssimulation (unten rechts).



**Abbildung 2**  
Elektrische Stromdichte im menschlichen Körper bei einem Blitzeinschlag in 11 m Entfernung:  
Im Querschnitt des gesamten Körpers (links) und im Herz (rechts). Die Diskretisierung des Herzens besteht aus vielen sehr kleinen Untervolumen (Gitterzellen).



Gleichungen entsteht ein i. A. sehr großes Gleichungssystem. Um auch den zeitlichen Verlauf der physikalischen Größen beschreiben zu können, muss dieses Gleichungssystem entsprechend der vorgegebenen Abtastung der Zeitachse sehr oft gelöst werden.

Die Größe des resultierenden Systems wird am Beispiel der elektromagnetischen Simulation eines menschlichen Körpers in einer komplexen Umgebung, z. B. in einem Flugzeug, deutlich. Dabei können die Rechengitter bis zu 1 Milliarde Zellen enthalten. Im Falle einer quaderförmigen Unterteilung des Gesamtvolumens entspricht dies 6 Milliarden zu berechnenden Zahlenwerten für die Feldstärken. Jeder Zahlenwert muss an bis zu 150.000 Zeitpunkten bestimmt werden. Somit ergeben sich fast Tausend Billionen Gleitkommazahlen (900.000.000.000.000), die berechnet, ge-

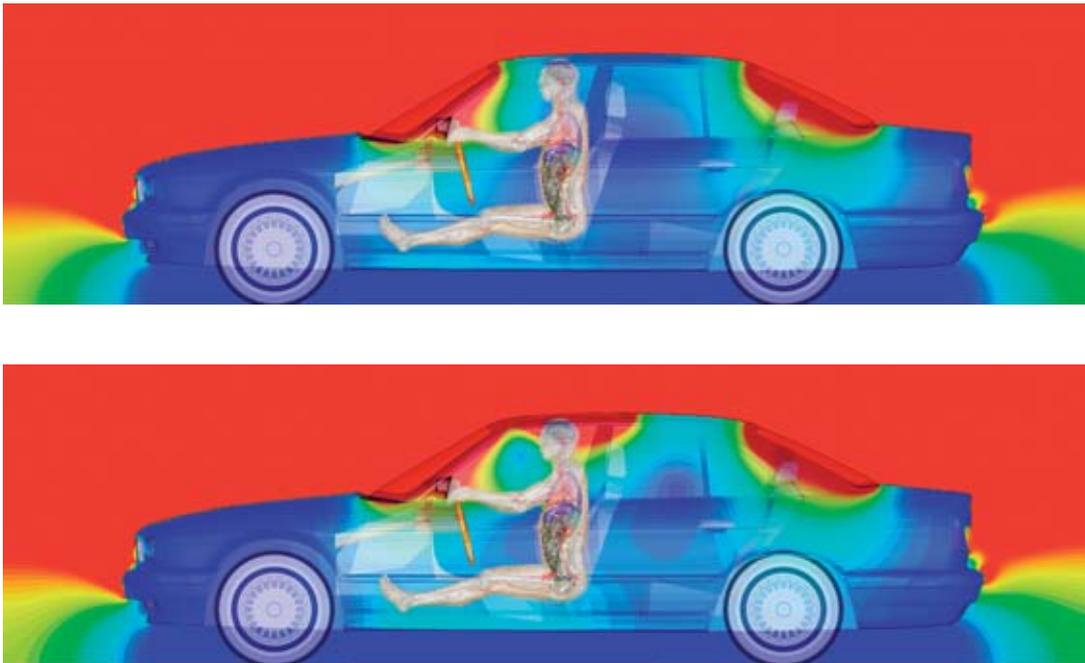
speichert, grafisch dargestellt und interpretiert werden müssen. Trotz der stetig wachsenden Rechenleistung und Speicherkapazität moderner Computer bleibt dies eine sehr anspruchsvolle und insbesondere zeitaufwändige Aufgabe. Durch die ständige Verbesserung der Algorithmen für die Simulation, die grafische Darstellung sowie die effiziente Speicherung derartiger Datenmengen wird heute die elektromagnetische Berechnung extrem komplexer Strukturen ermöglicht, welche bisher auch der Simulation nicht zugänglich waren.

#### Blitzeinschläge in der Simulation

Die Untersuchung der Auswirkungen von Blitzeinschlägen ist bereits seit langer Zeit Gegenstand verschiedenster theoretischer und praktischer Betrachtungen. Experimente hierzu gestalten sich schwierig und sind, insbesondere in Bezug auf natürlich vorkommende Blitze, äußerst gefährlich. Daher bieten elektromagnetische Simulationen eine vielversprechende Alternative. In einer Computersimulation können auch die unmittelbaren Auswirkungen von Blitzeinschlägen auf den menschlichen Körper untersucht werden, ohne Personen einer Gefahr auszusetzen. Eine Gefahr für die Gesundheit stellen nicht nur direkte Einschläge dar, sondern es kann auch zu indirekten Auswirkungen auf den Menschen kommen. Wenn ein Blitz beispielsweise in einen Mast einschlägt,

#### Blitzeinschläge in Zahlen

Im Jahr 2010 wurden in den USA 241 Menschen durch Blitzeinschlag verletzt und 28 getötet. In Deutschland gibt es 3 bis 7 Todesopfer pro Jahr. Die Verbesserung der Blitzschutzanlagen ist heute noch wichtig: 4% der Menschen, die durch Blitzeinschlag zu Tode kommen, befinden sich in Gebäuden, wie eine Statistik aus den USA zeigt. Die Schäden durch Blitzeinschläge, wie Hausbrände, Tod von Tieren oder Zerstörung elektronischer Geräte, werden in Deutschland jährlich auf mehrere Millionen Euro geschätzt.



**Abbildung 3**  
Elektrische Feldstärke in einem Querschnitt des Automodells, ohne Schiebedach (oben) und mit Schiebedach (unten). Bei einer Ausstattung mit Schiebedach treten hohe Feldstärken von 3 bis 10 kVolt pro Meter in der Region des Kopfes auf.

fließt ein sehr hoher Strom durch den Mast in die Erde und erzeugt dort ein elektrisches Feld. Zwischen den Füßen eines Menschen, der sich in der Umgebung aufhält und auf dem Boden steht, entsteht somit eine elektrische Spannung – die sogenannte Schrittspannung – welche zu einem möglicherweise gefährlich hohen Strom durch den Körper führt.

Das für die Simulationen verwendete hoch aufgelöste Modell des menschlichen Körpers (Abbildung 2, links) bietet eine geometrische Auflösung von bis zu 1 mm und unterscheidet 35 einzelne Gewebearten mit den zugehörigen physikalischen Eigenschaften. Für die Simulation eines Blitzeinschlages in der näheren Umgebung einer auf dem Boden stehenden Person wird zwischen den Füßen eine zeitlich veränderliche Spannung angelegt, die einem Blitzschlag in 11 m Entfernung, ohne Erdungsanlage, entspricht. Alle Simulationen wurden mit dem Programm CST STUDIO SUITE™ durchgeführt. Das Ergebnis der Simulation sind die elektrischen Ströme im menschlichen Körper, die mit Sicherheitsvorschriften verglichen werden können. Von besonderer Bedeutung ist in diesem

Zusammenhang die elektrische Stromdichte im Bereich des Herzens (Abbildung 2, rechts). Diese Untersuchung zeigt, dass ein Abstand von 11 m von der Einschlagstelle bereits eine sichere Entfernung darstellt. Je geringer der Abstand vom Punkt des

#### Graduate School of Computational Engineering

MSc. Jing Gao  
Tel. 06151/16 7438  
E-Mail: [gao@gsc.tu-darmstadt.de](mailto:gao@gsc.tu-darmstadt.de)  
[www.gsc.ce.tu-darmstadt.de](http://www.gsc.ce.tu-darmstadt.de)

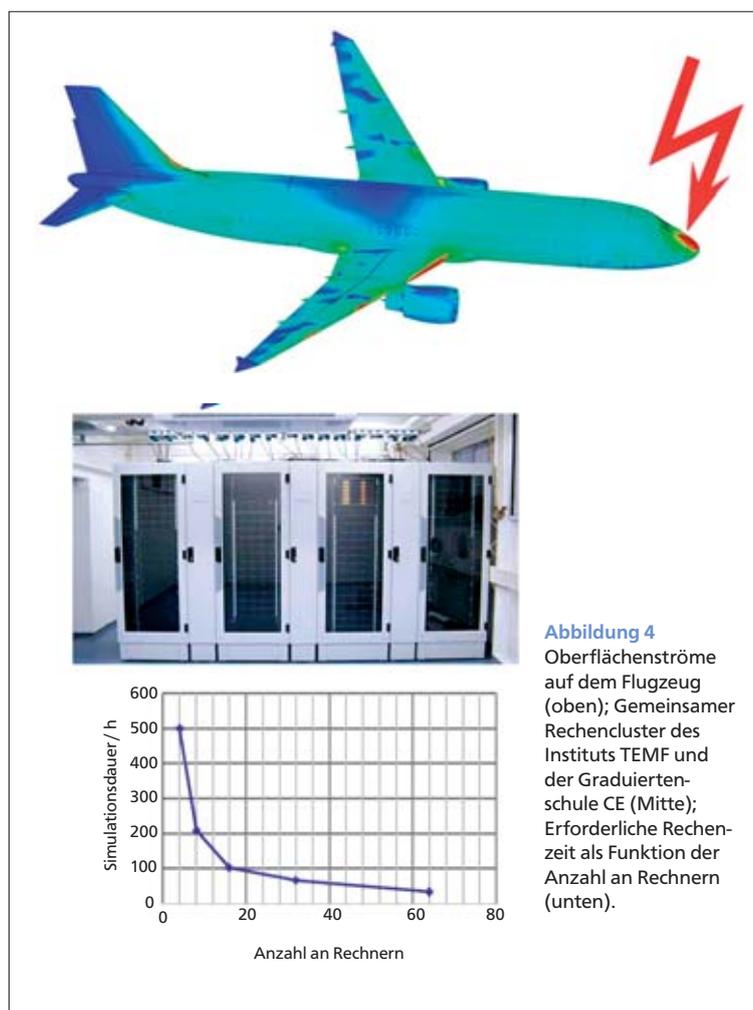
#### Computer Simulation Technology AG

Prof. Dr. Irina Munteanu  
Tel. 06151/73030  
E-Mail: [munteanu@cst.com](mailto:munteanu@cst.com)  
[www.cst.com](http://www.cst.com)

#### Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder

Dr.-Ing. Stephan Koch  
Tel. 06151/16 2361  
E-Mail: [koch@temf.tu-darmstadt.de](mailto:koch@temf.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Weiland  
Tel. 06151/16 2161  
E-Mail: [thomas.weiland@temf.tu-darmstadt.de](mailto:thomas.weiland@temf.tu-darmstadt.de)  
[www.temf.de](http://www.temf.de)



**Abbildung 4**  
Oberflächenströme auf dem Flugzeug (oben); Gemeinsamer Rechencluster des Instituts TEMF und der Graduiertenschule CE (Mitte); Erforderliche Rechenzeit als Funktion der Anzahl an Rechnern (unten).

#### Literatur

Weiland, Thomas (1997: Elektrosmog sichtbar gemacht; Physikalische Blätter. 53, No. 11, S. 1113-1115)

Weiland, Thomas (1977: Eine Methode zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für sechskomponentige Felder auf diskreter Basis; Electronics and Communication (AEÜ), 31, 116-120)

Dipp GmbH (2011: Anatomical volume data sets; www.vr-laboratory.com)

Computer Simulation Technology AG (2011: CST STUDIO SUITE™ User Manual; www.cst.com)

National Lightning Safety Institute (www.lightningsafety.com)

Einschlags, desto größer ist die Schrittspannung und somit die Gefahr für den Menschen.

Eine weitere Untersuchung befasst sich mit der Simulation eines direkten Blitzeinschlags in ein Auto, in dem sich ein Mensch befindet (Abbildung 1, links). Die Simulation wird je einmal für ein Karosseriemodell mit und ohne gläsernem (geschlossenem) Schiebedach durchgeführt. Mit Hilfe dieser Simulationen können die Werte der elektrischen Feldstärke im Inneren des Autos ermittelt werden. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die metallische Hülle des Autos einen zuverlässigen Schutz darstellt (Abbildung 3, oben). Im Falle der Ausstattung mit einem Schiebedach aus Glas (Abbildung 3, unten) sind die Feldwerte im Inneren des Autos jedoch deutlich höher, insbesondere im Bereich des Kopfes des Fahrers.

Nicht nur am Boden, sondern auch in der Luft ist die Sicherheit der Menschen durch Blitzeinschläge gefährdet. Ein Blitzeinschlag in ein Flugzeug kann sowohl direkt viele Menschenleben gefährden, als auch indirekt durch die mögliche Beeinträchtigung der komplexen Elektronik an Bord. Weiterhin können die sehr hohen Blitzströme, die durch ein Flugzeug fließen, mechanische Bestandteile durch kurzzeitige Überhitzung dauerhaft beschädigen. Allein durch die Flugzeuggröße stellt eine solche Simulation bereits eine Herausforderung dar. Hinzu kommen die vielen geometrischen Details im Inneren des Flugzeugs, sowie möglicherweise, je nach Fragestellung, die Kabelbäume und elektronischen Geräte. Somit ergibt sich in diesem Fall ein besonders komplexes Multiskalenproblem mit Dimensionen zwischen Mikrometern und mehreren Metern, welches es zu lösen gilt. In dem simulierten Modell eines Airbus A320 während des Flugs (Abbildung 1, oben) befinden sich Passagiere, Personal und Bestuhlung. Es wird ein Blitzeinschlag in die Nase des Flugzeugs (Radom) angenommen.

Durch die Komplexität der Geometrie entstehen große, möglicherweise gefährliche Stromdichten (rot in Abbildung 4, oben dargestellt) nicht nur an der Eintrittsstelle des Blitzes, sondern auch an den Tragflächen.

Um eine genaue Geometriebeschreibung zu erreichen, ist für dieses Problem ein Rechengitter mit über 500 Millionen Zellen erforderlich. Die für eine ausreichende Genauigkeit erforderliche Problemgröße übersteigt die Rechen- und Speicher-

kapazität eines einzelnen Computers erheblich. Abhilfe verspricht die Verteilung der Berechnung auf Rechencluster, welche aus zahlreichen einzelnen Rechnern bestehen, die über ein schnelles Netzwerk zum Datenaustausch verbunden sind. Das Modell wurde auf einem Verbund aus 172 Rechnern (Abbildung 4, mitte), die jeweils mit 2 Hexacore CPUs mit 2,67 GHz Taktfrequenz und 24 GB Arbeitsspeicher ausgestattet sind, simuliert. Mit zunehmender Anzahl eingesetzter Rechner kann die Simulationsdauer deutlich verringert werden (Abbildung 4 unten).

Diese sind nur einige Beispiele, die belegen, dass Simulationen heutzutage in Bereichen eingesetzt werden, in denen bis vor wenigen Jahren nur aufwendige Messungen oder stark vereinfachte Modelle verwendet werden konnten. Die stetig wachsende Rechenleistung hat dazu einen großen Beitrag geleistet, der aber nur im Zusammenhang mit den enormen Fortschritten bei den Simulations- und Auswertungsalgorithmen zur heutigen Leistungsfähigkeit elektromagnetischer Simulationen geführt hat.



**Jing Gao** ist Doktorand an der Graduate School of Computational Engineering der Technischen Universität Darmstadt und erforscht Algorithmen zur Bewegung elektronischer Menschmodelle.



**Stephan Koch** leitet am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt eine Nachwuchsforschergruppe. Seine Forschungsinteressen sind Berechnungsverfahren für elektromagnetische Felder.



**Irina Munteanu** ist in Teilzeit Industrieprofessorin an der TU Darmstadt in der Graduate School of Computational Engineering und Projektkoordinatorin bei der Computer Simulation Technology AG (CST AG) in Darmstadt.



**Thomas Weiland** ist Professor für das Fach Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt und forscht seit über drei Dekaden auf dem Gebiet der numerischen Berechnung elektromagnetischer Felder.

C# TDD eCommerce Excellent written and spoken English  
 team player  
 Database Refactoring innovative  
 Scrum Innovationspreis IT award  
 Continuous Integration Agile international  
 .NET MS SQL  
 NoSQL Design Patterns  
 transparent



Liebst Du Software?

Gestatten: **Verivox** – das größte, unabhängige Verbraucherportal für die Bereiche Energie und Telekommunikation

Wir sind zwar keine ausgemachten Romantiker, trotzdem würden wir gerne um Dich werben.

Inzwischen sind wir 13 Jahre alt und beherbergen 21.000 Tarife in unseren Datenbanken. Um uns fit zu halten, haben wir uns für die **Agile Methode (Scrum)** entschieden:

→ täglich **extreme programming** → **NoSQL** → **TDD** → **MVP** → **MVC** → zum Entspannen zwischendurch mal **design pattern** entwickeln oder Kicker spielen

– und das alles 5 Tage die Woche in einem jungen, internationalen, kreativen, aufgeschlossenen und code-verrückten Team. Hier sind alle in sämtliche Phasen eines Projektes eingebunden und können selbstständig und eigenverantwortlich arbeiten, aber natürlich jederzeit mit Unterstützung rechnen.

Wir sind an einer langfristigen Bindung mit Dir interessiert und wollen eine gleichberechtigte Partnerschaft mit Dir eingehen.

Wenn wir Dein Herz gewinnen konnten, dann melde Dich bei uns – am besten per E-Mail: [jobs@verivox.de](mailto:jobs@verivox.de)



Verivox GmbH | Sabrina Metzger | Human Resources  
 Am Taubenfeld 10 | D-69123 Heidelberg

# Phasenfeldsimulationen ferroelektrischer Werkstoffe

Aufgrund ihrer interessanten elektromechanischen Eigenschaften sind ferroelektrische Materialien aus unserer heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Um diese Materialien an neue Anwendungsbereiche anzupassen, bzw. die Eigenschaften und Zuverlässigkeit dieser Materialien weiter zu steigern, ist ein genaues Verständnis der internen physikalischen Prozesse nötig. Immer stärker werdende Computer und verbesserte Algorithmen erlauben es, die grundlegenden Gleichungen für immer kompliziertere Sachverhalte zu lösen. Somit ist es möglich, zu einem tieferen Verständnis zu kommen, als dies mit Experimenten alleine der Fall wäre.

## ► Phase Field Simulations of Ferroelectric Materials

*Ferroelectric materials are increasingly used in engineered structures because of their excellent electromechanical properties. Due to the numerous different systems classes that utilize ferroelectrics, it is necessary to tailor the material properties to the specific application. Materials modeling facilitates the investigation of the underlying physics in observed phenomena, allowing for the study of particular aspects of material behavior. Increasing computing power has allowed for the implementation of more complex and physically realistic models, which have helped to gain insight that would not have been possible with experiments alone.*

**Daniel J. Franzbach, Kyle G. Webber, Jürgen Rödel** • Ferroelektrika sind eine Gruppe von Funktionsmaterialien, die eine spontane elektrische Polarisation aufweisen. Diese Polarisation lässt sich dabei durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes von einer stabilen kristallografischen Ausrichtung in eine von mehreren energetisch äquivalenten Ausrichtungen umorientieren. Ferroelektrika werden heutzutage für moderne Anwendungen wie beispielsweise medizinische Ultraschallsysteme, Unterwasser-Sonare und Kraftstoffventile in Dieselmotoren benötigt und sind daher von hohem kommerziellem Interesse. Üblicherweise werden polykristalline Materialien verwendet, da diese eine größere elektromechanische Kopplung aufweisen und sich darüber hinaus kostengünstiger herstellen lassen als ihre einkristallinen Pendanten. Dieser elektromechanische Kopplungsmechanismus macht Ferroelektrika interessant für neuartige Modellierungsansätze. Die dielektrischen Wechselwirkungen zwischen den elektrischen Dipolen innerhalb des Systems sind dabei vergleichbar mit denen mag-

netischer Dipolen innerhalb eines Ferromagneten. Allerdings sind in Ferroelektrika nur bestimmte energetisch stabile Polarisationsrichtungen durch die Kristallstruktur zugelassen, und die elektromechanischen Wechselwirkungen übersteigen die magnetomechanischen um Größenordnungen. Diese Punkte müssen bei der theoretischen Beschreibung berücksichtigt werden und verhindern eine einfache Übertragung theoretischer Modelle von ferromagnetischen Systemen.

Die am häufigsten in der Literatur anzutreffenden Modellierungsansätze zur Beschreibung von Ferroelektrika sind ab-initio-Rechnungen, phänomenologische mikromechanische Modelle und Phasenfeldmodelle basierend auf der Ginzburg-Landau (GL) Theorie. Ab-initio-Rechnungen sind in der Lage, das Verhalten einzelner Atome im Festkörper genauer zu beschreiben und präzise Voraussagen beispielsweise über die Dynamik struktureller Defekte zu machen. Allerdings sind diese Modelle örtlich stark beschränkt und können selten mehr als ein paar zusammenhängende Einheitszellen beschreiben. Im Gegensatz dazu können mikromechanische Modelle das Materialverhalten ferroelektrischer Polykristalle auf Bauteilskala beschreiben. Allerdings werden mikroskopische Effekte innerhalb einzelner Körner lediglich indirekt über Modellparameter berücksichtigt und entziehen sich damit einer genauen Untersuchung.

## Ginzburg-Landau Phasenfeldmodelle

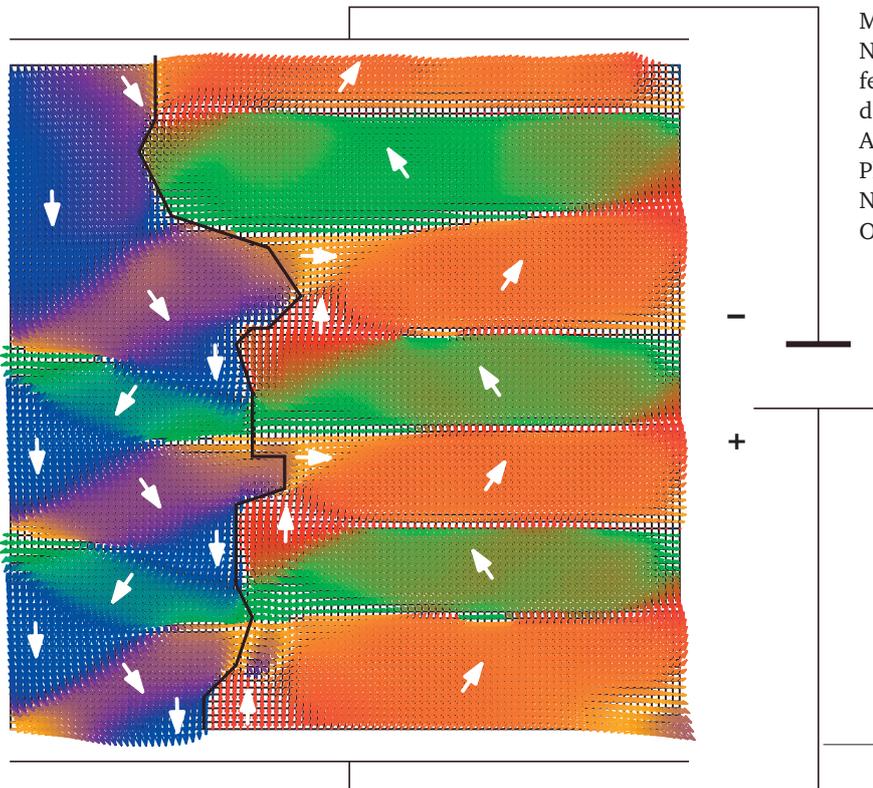
GL Phasenfeldmodelle schließen die mesoskopische Lücke zwischen ab-initio- und mikromechanischen Modellen. Der Ausgangspunkt ist dabei

### Landau-Theorie

Die Landau-Theorie ist ein physikalisches Modell aus der Thermodynamik, um Phasenübergänge zu beschreiben. Dafür wird Abhängigkeit der freien Energie des Systems vom sogenannten Ordnungsparameter in der Nähe des Phasenübergangs durch ein Polynom angenähert. In ferroelektrischen Systemen ist dieser Ordnungsparameter die Polarisation. Dabei hängt mindestens einer dieser Polynom-(Landau)-Koeffizienten von der Temperatur ab und bestimmt, ob es eine oder mehrere stabile Energieminima gibt.

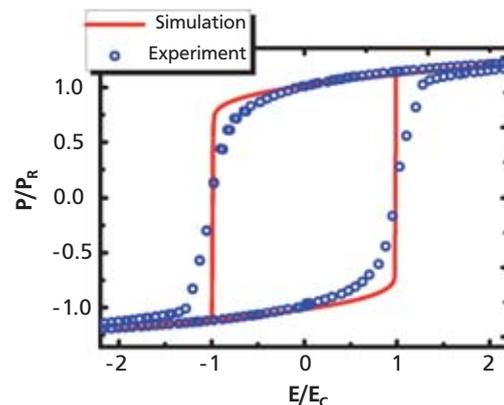
die thermodynamische Grundannahme, dass alle wichtigen physikalischen Größen als kontinuierliche Felder darstellbar sind, d.h., physikalische Prozesse auf atomarer Ebene statistisch behandelt werden können. Die Folge ist, dass diese atomaren

Prozesse nicht zugänglich sind, und man bei einigen Materialparametern auf Ergebnisse von ab-initio-Rechnungen angewiesen ist. Allerdings ist man räumlich auf die Darstellung einzelner Körner oder Nanostrukturen beschränkt, da einerseits die maximale Elementgröße in der zur numerischen Lösung verwendeten Finite-Element Methode von der Ausdehnung der Domänenwände innerhalb des Materials beschränkt ist. Andererseits bedingt Nichtlinearität in den zu lösenden gekoppelten Differentialgleichungen einen hohen Rechenaufwand, der auf heutigen Rechnern nur eine begrenzte Anzahl an Elementen zulässt. Die Stärken der Phasenfeldmodelle liegen in der Berechnung von Nanostrukturen. Dabei können Auswirkungen der Oberflächenstruktur auf das elektromechanische



**Abbildung 1**

Oben: Berechnete Domänenstruktur eines 2-dimensionalen, inhomogenen, ferroelektrischen Einkristalls während eines Polarisations-Umorientierungsvorgangs („ferroelektrisches Schalten“), hervorgerufen durch eine angelegte Spannung. Die weißen Pfeile zeigen die vorherrschende Richtung der Polarisation in ihrer Umgebung (Domänen) an. Die Bereiche links der schwarzen Linie sind bereits umorientiert. Während des weiteren Schaltvorgangs bewegt sich diese Linie weiter nach rechts, bis die gesamte Domänenstruktur umgeschaltet ist. Rechts: Ferroelektrische Polarisationshysterese im Modell (rote Linie), bzw. im Experiment (blaue Kreise).



#### Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe

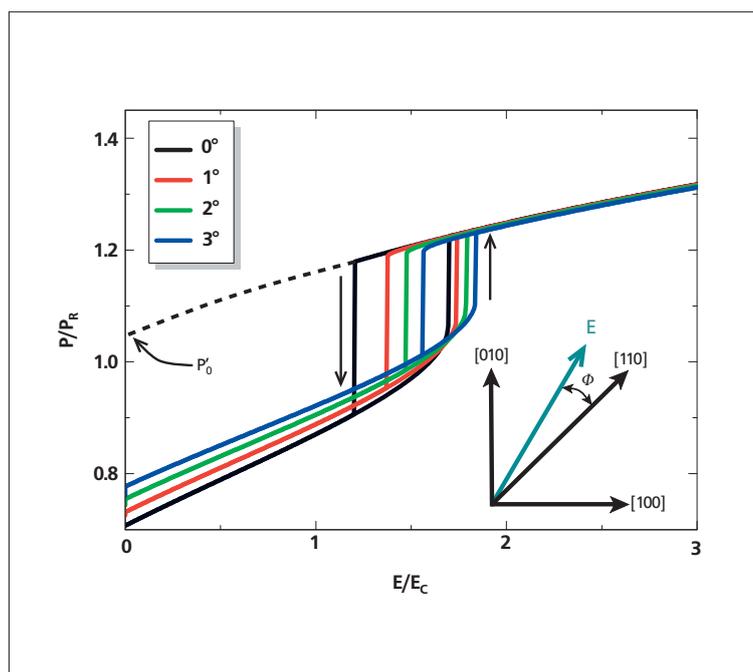
Daniel J. Franzbach  
Tel. 06151/16-6311  
E-Mail: [franzb@ceramics.tu-darmstadt.de](mailto:franzb@ceramics.tu-darmstadt.de)

Dr. Kyle G. Webber  
Tel. 06151/16-6319  
E-Mail: [webber@ceramics.tu-darmstadt.de](mailto:webber@ceramics.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr. Jürgen Rödel  
Tel. 06151/16-6315  
E-Mail: [roedel@ceramics.tu-darmstadt.de](mailto:roedel@ceramics.tu-darmstadt.de)  
[www.mawi.tu-darmstadt.de/nav/](http://www.mawi.tu-darmstadt.de/nav/)

**Abbildung 2**

Feldinduzierte elektrische Polarisation bei unterschiedlichen Winkeln bezüglich der kristallografischen  $\langle 110 \rangle$ -Richtung (siehe eingefügte Grafik). Sowohl die Polarisation als auch das elektrische Feld sind normalisiert mit dem Betrag der Polarisation der Einheitszelle ohne angelegtes elektrisches Feld  $P_0$ , bzw. des Koerzitivfeldes  $E_c$ . Mit zunehmendem Winkel ist sowohl eine Änderung der Hysteresekurve als auch der anfänglichen linearen piezoelektrischen Eigenschaften zu beobachten.



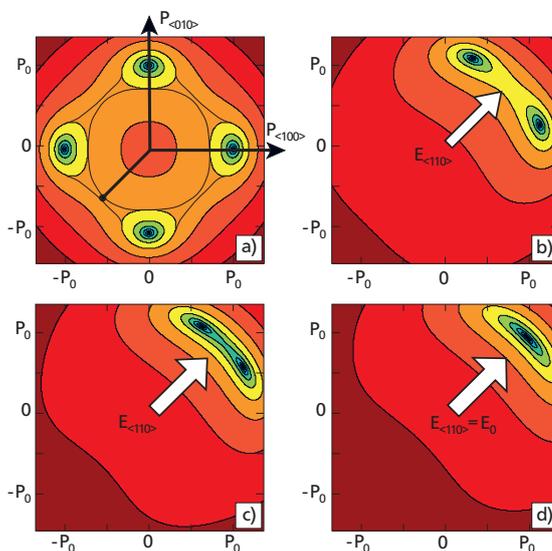
Verhalten der Nanomaterialien untersucht werden. Die auf diesem Weg gewonnenen Erkenntnisse können benutzt werden, um genauere Schaltkriterien für mikromechanische Modelle zu bestimmen. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kristalldefekten, Ladungsträgern und Rissen mit der intrinsischen Domänenstruktur. So können Rückschlüsse auf das Alterungs- bzw. Ermüdungsverhalten und auf die Zuverlässigkeit ferroelektrischer Bauteile gemacht werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung dieses Modells ist die geeignete Wahl der Landau-Koeffizienten. Diese werden bisher zumeist aus temperaturabhängigen Permittivitätsmessungen gewonnen.

#### Aktuelle Forschung

Aktuelle Untersuchungen an der TU Darmstadt konnten zeigen, dass es mit der GL-Theorie möglich ist, über die Domänedynamik hinaus feldinduzierte Phasentransformationen abzubilden. Dieses Phänomen wurden bereits früher in ferroelektrischen Einkristallen, wie  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$

**Abbildung 3**

Verlauf der Landau-Energie eines tetragonalen Einkristalls (a) unter der Abwesenheit eines äußeren elektrischen Feldes. Dunkelblaue Flächen bezeichnen hierbei Areale niedrigerer Energie, dunkelrote Flächen repräsentieren Areale höherer Energie. Die Energiebarrieren für  $180^\circ$  ( $G_0$ ) und  $90^\circ$  ( $G_1$ ) Schaltprozesse befinden sich an den Orten  $P = (0, 0)$ , beziehungsweise  $P_i = (\pm qP_0, \pm qP_0)$ . Mit zunehmendem äußeren Feld (b), (c) in Richtung der orthorhombischen Kristallrichtung lässt sich eine Rotation der Polarisation über eine Verschiebung der Energieminima in Richtung des äußeren Feldes beobachten. Ab einem gewissen kritischen Feld  $E_0$  fallen beide Minima zusammen (d). Es existiert nur noch eine stabile Polarisationsrichtung entlang der  $\langle 110 \rangle$ -Richtung.



$\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  bzw.  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  experimentell nachgewiesen. Diese Materialien, mit einer chem. Zusammensetzung nahe der morphotropen Phasengrenze zwischen den tetragonalen (T) und rhomboedrischen (R) ferroelektrischen Phasen, zeigen darüber hinaus eine ungewöhnlich hohe elektromechanische Kopplung und eine vergrößerte induzierte mechanische Verschiebung bei gleichzeitig reduzierter Hysterese. Daher eignen sich diese Materialien gut für den Einsatz als piezoelektrische Aktuatoren mit geringer Verlustleistung. Der Zusammenhang dieser Phänomene wurde zuerst von Park und Shrout vorgeschlagen und von weiteren experimentellen Untersuchungen bestätigt. Für Untersuchungen von feld-

#### Literatur

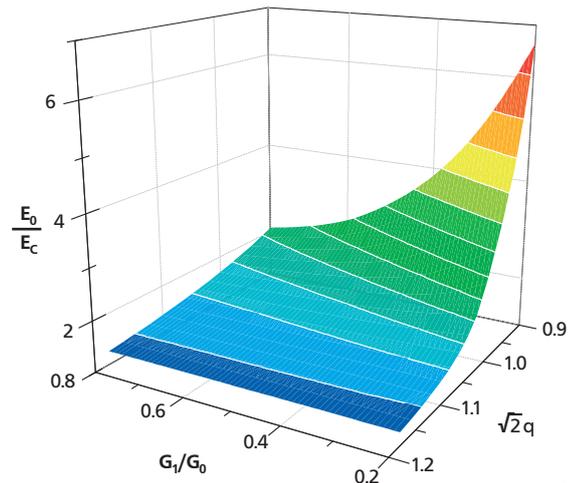
Park, S.E. and Shrout, T.R.; J. Appl. Phys., 1997, 82 (4), 1804  
 Bell, A. J.; Appl. Phys. Lett. 76 (1), 2000, 109  
 Schrade, D.; Mueller, R.; Xu, B and Gross D., Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 2007, 196 (41-44), 4365

induzierten tetragonal zu orthorhombischen (T-O) Phasentransformationen in ferroelektrischen Perowskitkristallen wurde ein zeitabhängiges Phasenfeldmodell basierend auf der GL-Gleichung verwendet. Durch Variation der Landau-Koeffizienten war es möglich, das Phasentransformationsverhalten in Abhängigkeit der Energieschwelle für 90° Schaltprozesse, bzw. unterschiedlicher Polarisationsrotationspfade zu studieren. Durch Koordinatentransformation war es darüber hinaus möglich, Auswirkungen kleiner Kristallfehlstellungen zu untersuchen, welche sich in experimentellen Untersuchungen nie ganz vermeiden lassen und die theoretischen Resultate somit leichter mit experimentellen Daten vergleichbar machen. Es ist nun möglich, Daten aus Phasentransformationsmessungen zu nutzen, um weitere Methoden für die Bestimmung und die Verifikation von Landau-Parametern zu erhalten. Die numerischen Berechnungen wurden auf der Basis einer Element-Implementierung der Allen-Cahn Relaxationsgleichung und der stationären mechanischen sowie elektrischen Zustandsgleichung innerhalb des Finiten-Element Programms FEAP durchgeführt. Zur Vereinfachung wurde das Modell auf zwei Dimensionen beschränkt. Als Ausgangspunkt der Berechnung wurde ein eindomäniger ferroelektrischer Einkristall unter kräftefreien mechanischen Randbedingungen angenommen.

Die dabei berechneten T-O Phasentransformationen (Abbildung 2) zeigen einen Hysterese behafteten Verlauf, welcher sowohl von der Frequenz des angelegten unipolaren elektrischen Wechselfeldes, als auch von der kristallografischen Orientierung des Systems abhängt. Je geringer die Frequenz, desto später tritt die Phasenrücktransformation bei sinkendem elektrischen Feld auf. Der Verlauf der Transformation bei ansteigendem elektrischen Feld, sowie das kritische Feld, ab dem es zu einer Phasenumwandlung kommt, werden durch eine Frequenzänderung kaum beeinflusst.

### Dreidimensionales Modell

Bisherige Untersuchungen waren auf zwei Dimensionen beschränkt, wodurch sich lediglich T-O Phasenumwandlungen umsetzen ließen. Diese Art der Phasenumwandlung wird jedoch selten in realen Systemen beobachtet. Weitergehende Untersuchungen werden die Erweiterung des Modells auf



**Abbildung 4**

Das kritische Phasenumwandlungsfeld  $E_0$  in Relation zum Koerzitivfeld  $E_c$  als Funktion der Simulationsparameter  $q$ , welcher den Pfad der Polarisationsrotation während 90° Schaltvorgängen beschreibt und das Verhältnis der beiden Energiebarrieren für 90°, bzw. 180°-Schaltprozesse ( $G_1 / G_0$ ).

drei Dimensionen umfassen, was die Untersuchung aller Phasenumwandlungen zwischen den drei üblichen ferroelektrischen Phasen (tetragonal, rhomboedrisch, orthorhombisch) erlaubt. Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen auf der Basis des vorgestellten GL-Phasenfeldmodells geplant, um bessere Erklärungsansätze für das Ermüdungs- und Alterungsverhalten ferroelektrischer Materialien zu erforschen. Dies wird durch eine Erweiterung des Modells um die Energiebeiträge eines umorientierbaren Defektdipolsystems, bzw. der Driftbewegung freier Ladungsträgern ermöglicht.



**Daniel J. Franzbach** ist seit 2009 Stipendiat der Graduiertenschule CE und arbeitet im Fachgebiet Materialwissenschaften der TU Darmstadt.



**Kyle G. Webber** ist seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe an der TU Darmstadt.



**Jürgen Rödel** ist Professor für Materialwissenschaften an der TU Darmstadt. Er ist Leibnitz-Preisträger 2009, forscht im Bereich der Piezokeramiken und Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe.

# Kompakte

## Teilchenbeschleuniger der Zukunft

Plasmawakefeldbeschleunigung stellt einen vielversprechenden Ansatz für zukünftige Teilchenbeschleuniger dar. Das Forschungsfeld befindet sich gerade in einer sehr dynamischen Phase. Das liegt vor allem an der rasant fortschreitenden Lasertechnologie, die bereits Hochleistungspulse sehr kurzer Dauer für entsprechende Experimente zur Verfügung stellt. In diesem Artikel werden die Grundlagen der Plasmawakefeldbeschleunigung erläutert; der aktuelle Forschungsstand wird beschrieben sowie die Zukunftsperspektiven diskutiert.

### ► Compact Particle Accelerators for the Future

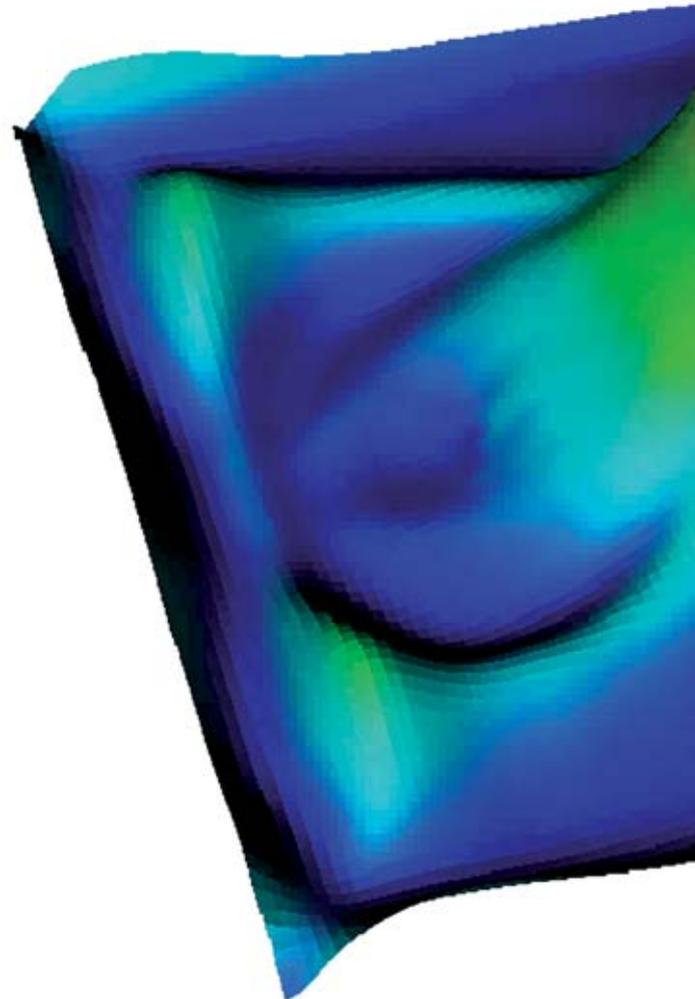
*Plasma Wakefield Acceleration is a very promising approach for future particle accelerators. The field is presently undergoing major developments. This is mainly due to the rapidly advancing laser technology, which provides high-power pulses of very short duration for this kind of experiments. In this paper the basics of Plasma Wakefield Acceleration are explained. Furthermore, the state-of-the-art and future perspectives of this technology are discussed.*

**Erion Gjonaj, Thomas Weiland** • Teilchenbeschleuniger sind ein wichtiges Instrument der Grundlagenforschung. Sie finden ihre Anwendung längst auch in anderen Gebieten wie beispielsweise zur Erzeugung kurzweiliger Laserstrahlen, zur Tumorbehandlung in der Medizin und in der materialverarbeitenden Industrie. Der derzeit leistungsfähigste Beschleuniger ist der Large Hadron Collider am Europäischen Forschungslabor CERN. Dort werden Protonenstrahlen in ringförmigen Bahnen auf Energien von bis zu 3.5 TeV gebracht. Ein weiteres Großprojekt, das sich gegenwärtig in der Entwurfsphase befindet, ist der International Linear Collider (ILC). Dabei handelt es sich um einen 27 km langen Linearbeschleuniger für Elektronen und Positronen mit einer Endenergie von 0.5 TeV bis etwa 1 TeV. Der Kern des ILC besteht aus ca. 16.000 supraleitenden Hochfrequenzresonatoren, die Beschleunigungsfeldstärken von über 30 Millionen Volt pro Meter (MV/m) ermöglichen sollen. Gleichwohl ist die Entwicklung, Fertigung und Pflege derartiger Anlagen mit erheblichen Kosten verbunden. Bezeichnend dafür sind die voraussichtlichen Kosten des ILC. Diese sollen sich auf mindestens 10 Milliarden US Dollar belaufen. Daher wird seit vielen Jahren und immer

wieder versucht, vollkommen neue Wege zur Teilchenbeschleunigung zu gehen. Die Plasmawakefeldbeschleunigung (PWFA) steht als letzte in der langen Reihe früherer Bemühungen, kompaktere und kostengünstigere Beschleunigeranlagen zu ermöglichen.

#### Prinzip der PWFA

Wird ein zunächst ruhendes Plasmamedium durch einen elektromagnetischen Puls angeregt, so werden vorzugsweise die leichten Elektronen in Bewegung gesetzt. Es kommt im Bereich des Pulses zur

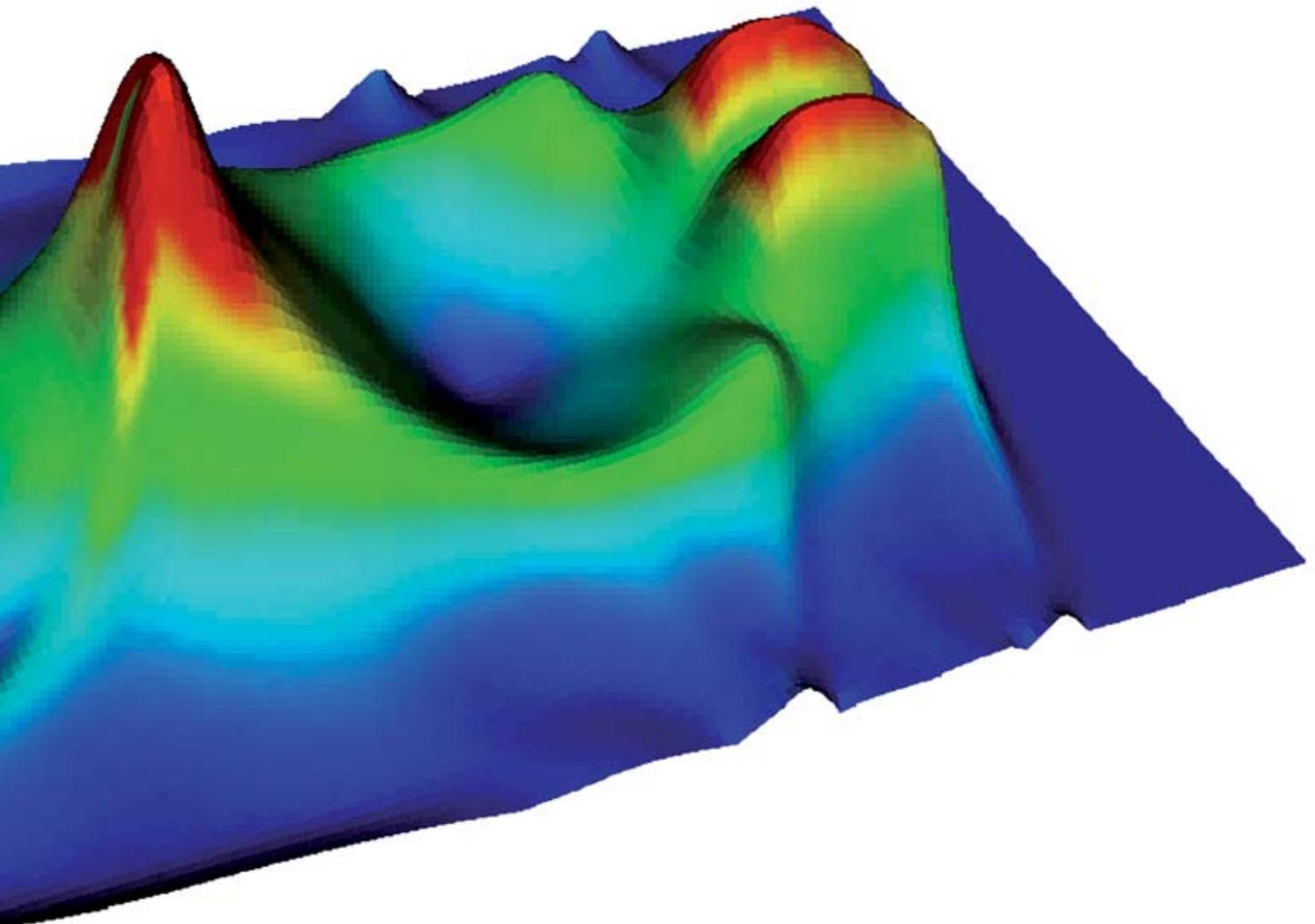


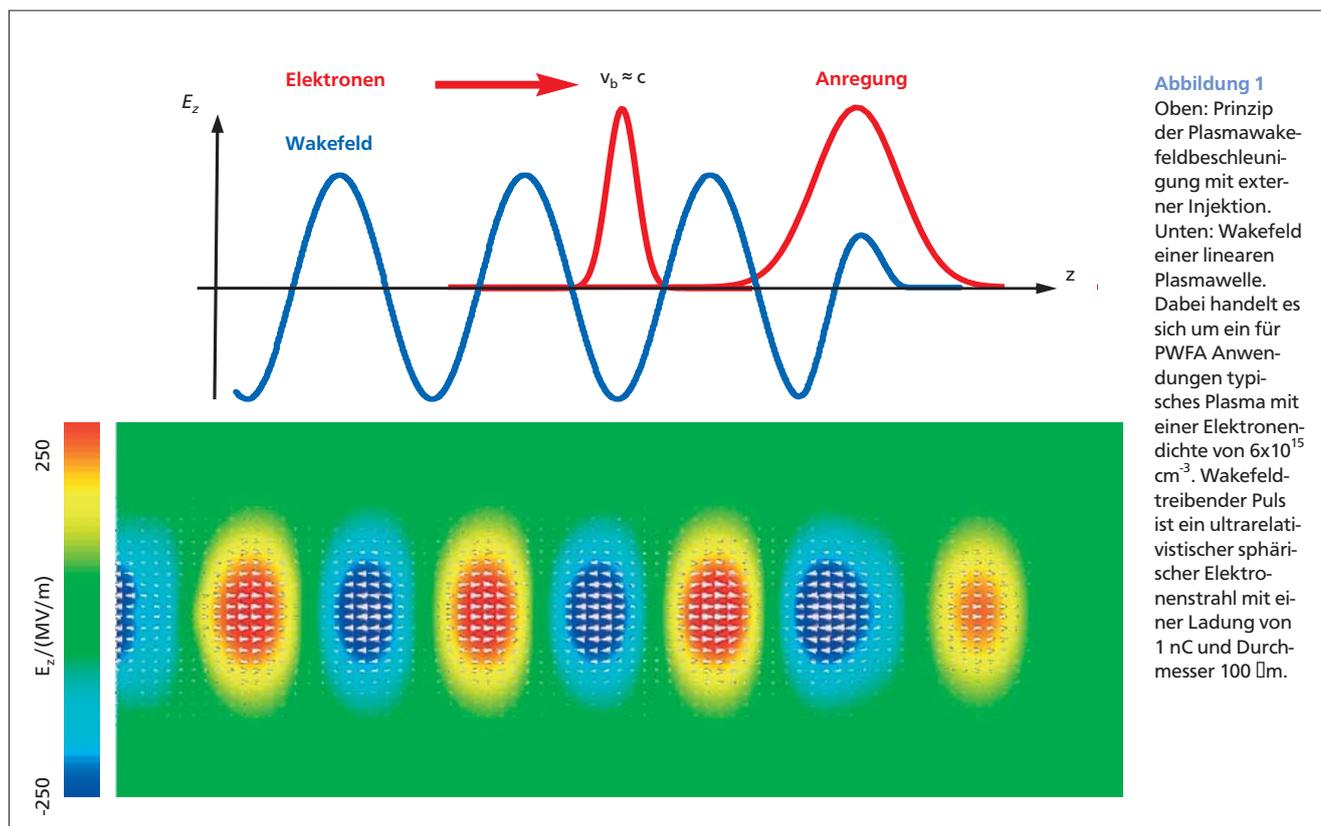
Ladungstrennung zwischen den beweglichen Elektronen und den, aufgrund ihrer größeren Masse, im Hintergrund weitgehend statisch verbleibenden positiv geladenen Ionen. Die Plasmaelektronen werden von den Ionen zurückgezogen und beginnen somit eine Schwingbewegung um ihre ursprünglichen Positionen herum. Die so entstandene Modulation der Plasmadichte zeichnet sich durch ein starkes elektromagnetisches Feld aus, das sich hinter dem treibenden Puls wellenartig ausbreitet. In der Literatur hat sich für dieses Feld die anschauliche Analogie mit der Welle am Kielwasser eines

Schiffes (engl. wake) etabliert – daher auch die Bezeichnung „Wakefeld“.

Wakefelder in Plasmen besitzen, ähnlich wie die HF-Felder in herkömmlichen Beschleunigerresonatoren, eine ausgeprägte longitudinale elektrische Komponente. Damit können diese im Prinzip Energie auf geladene Teilchen übertragen. Das kann beispielsweise geschehen, indem ein Teilchenpaket von außen in das Plasma injiziert wird (siehe Abbildung 1). Wird der Zeitpunkt der Injektion genau mit einer beschleunigenden Phase des Wakefeldes abgestimmt, so kann das Teilchenpaket Energie ge-

Blasenförmiges Wakefeld (elektrische Feldstärke) eines Elektronenstrahls im Plasma.





winnen. Es handelt sich hierbei um das sog. PWFA mit externer Injektion. Dieses Beschleunigungsschema wurde bereits früh von Tajima (1979) vorgeschlagen [1], wobei als Anregungspuls ein Laserpuls dienen sollte. Plasmawakefelder können alternativ auch mithilfe eines hochenergetischen Teilchenstrahls angeregt werden, der zuvor in ei-

nem herkömmlichen Beschleuniger erzeugt wurde (Chen, 1985) [2].

Abbildung 1 zeigt das Beispiel eines Plasmawakefeldes. Die Ähnlichkeit mit den stehenden Wellen in herkömmlichen Beschleunigerresonatoren ist nahezu vollkommen. Die Feldstärke im Plasma liegt allerdings um ca. sechs Mal höher als die Feldstärken, die in supraleitenden Kavitäten jemals erzeugt werden konnten. Die Länge eines PWFA-Beschleunigers würde dementsprechend nur ein Sechstel eines HF-Beschleunigers betragen müssen, um die gleiche Teilchenenergie zu erzielen.

Die Anwendung von PWFA mit externer Injektion unterliegt allerdings grundsätzlichen Einschränkungen. Da Plasmawakefelder mit einer niedrigeren Phasengeschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum propagieren, kann das Teilchenpaket nach kurzer Zeit die beschleunigende Phase ver-

Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder

Erion Gjonaj

Tel. 06151/16-2561

E-Mail: gjonaj@temf.tu-darmstadt.de

Thomas Weiland

Tel. 06151/16-2161

E-Mail: thomas.weiland@temf.tu-darmstadt.de

[www.temf.de](http://www.temf.de)

lassen. Ähnlich verhält es sich mit der Stärke des Anregungspulses. Dieser, ob Laser oder Teilchenstrahl, verliert nach kurzer Strecke an Intensität und ist somit nicht in der Lage, weiterhin das Wakefeld zu tragen. Damit darf die effektive Beschleunigungstrecke nur wenige Zentimeter betragen. Aus diesen Gründen erwies sich das Verfahren mit externer Injektion im Hinblick auf die Anforderungen moderner Teilchenbeschleuniger bis heute als ungeeignet.

#### PWFA Forschung heute

In den späten 90er Jahren versuchte man kurze Laserpulse hoher Intensität in PWFA Experimente einzusetzen. Die Hoffnung war, Feldstärken von mehreren Hunderten GV/m anzuregen, um dadurch die notwendige Beschleunigungstrecke zu verkürzen. Diese Entwicklung war nicht zuletzt einer neuen Generation von ultrastarken Lasern zu verdanken, die es ermöglichten, Laserpulse von wenigen 10 fs Dauer und Leistungen von mehreren PW zu erzeugen. Es waren jedoch nicht die Laborversuche, sondern numerische Simulationen, die den Durchbruch schafften. Pukhov (2002) [3] entdeckte in aufwendigen Simulationen einen hoch nicht-linearen aber stabilen Plasmavorgang. Ist der Anregungspuls stark genug, so werden fast alle Plasmaelektronen aus seiner Umgebung verdrängt. Es entsteht ein blasenförmiges elektronenfreies Gebiet „bubble“, das sich synchron mit der Anregung bewegt und durch besonders starke Wakefelder gekennzeichnet ist (vgl. Abbildung 2). Die wichtigste Beobachtung dabei ist, dass einige Plasmaelektronen in der Blase gefangen werden können, und dass das so gebildete Elektronenbündel sich automatisch in der Beschleunigungsphase des Wakefeldes befindet. Somit gewinnt es stets Energie und kann als neuer hochenergetischer Elektronenstrahl aus dem Plasma extrahiert werden.

Der Selbstinjektionsmechanismus wurde im Jahr 2004 von drei Gruppen in Großbritannien, den USA und Frankreich unabhängig voneinander experimentell bestätigt [4,5,6]. Dabei konnten Elektronenstrahlen mit einer Energie von bis zu 170 MeV erzeugt werden. Ein weiterer Meilenstein der Forschung zeichnete sich 2006 ab. Lehmanns et al. gelang es, einen Elektronenstrahl in einem durch Kapillarentladung präpariertem Plasmakanal auf 1 GeV zu beschleunigen [7]. Die Energieabweichung

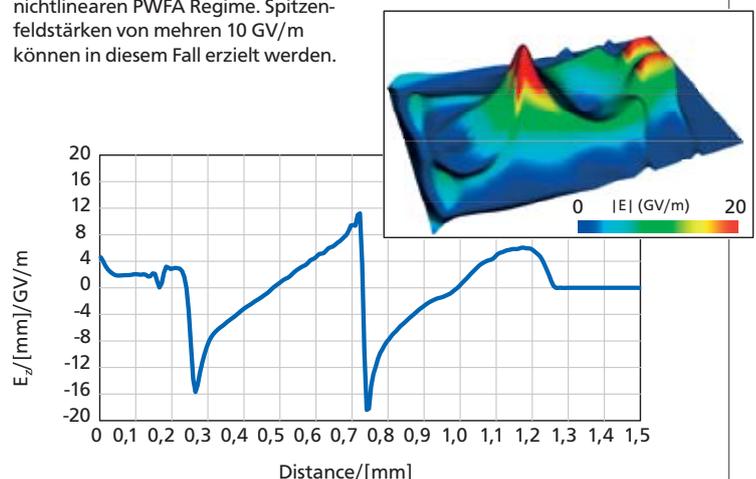
des Elektronenstrahls betrug dabei weniger als 5 %. Im Jahre 2008 berichtete eine Gruppe aus Jena erstmalig über einen Freien-Elektronen-Laser, der durch einen PWFA-Beschleuniger betrieben wurde (engl. table-top FEL) [8]. Damit ist eine der wichtigsten Anwendungen der klassischen Beschleunigertechnik in Reichweite der PWFA gerückt. Wichtiges Ziel der aktuellen Forschung ist die Erzeugung von Teilchenstrahlen mit hoher Qualität – d. h. mit schmaler Energieverteilung und niedriger

#### Energie geladener Teilchen

Die Energie geladener Teilchen beschreibt man in eV. Das ist die Energie, die eine Elektron mit der Ladung  $e$  beim Durchlaufen einer Spannung von einem Volt gewinnt. Längst sind leistungsstarke Beschleuniger gebaut worden, die Elementarteilchen auf viele GeV = Giga-Elektronen-Volt beschleunigen können. Am CERN erreicht man bald 3,5 TeV (Tera-Elektronen-Volt), was einer Spannung von 3.500.000.000.000 Volt entspricht.

**Abbildung 2**

Verlauf der ultra-starken Wakefelder entlang der Propagationsachse im nichtlinearen PWFA Regime. Spitzenfeldstärken von mehr als 10 GV/m können in diesem Fall erzielt werden.



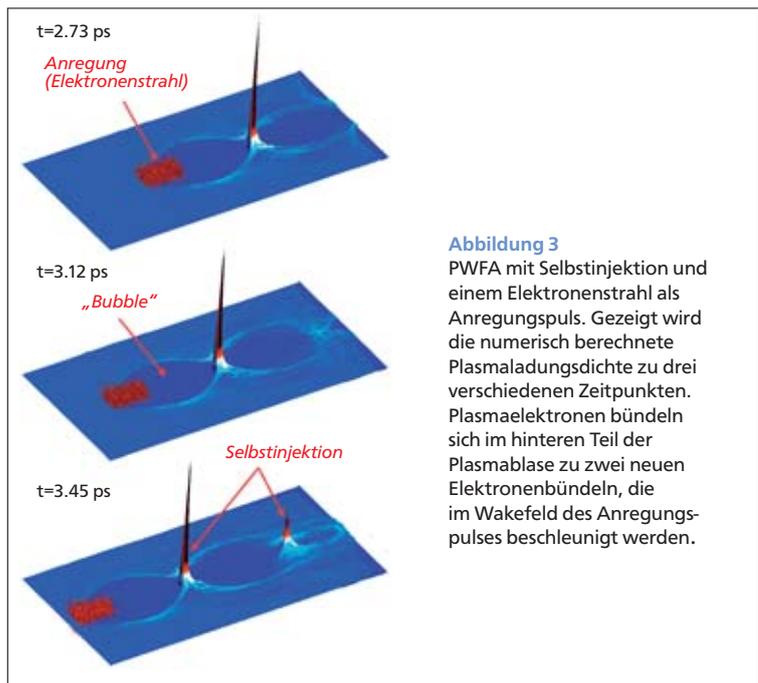
Strahldivergenz. Hier die optimalen Parameter zu finden (Plasmadichte, Typ und Stärke der Anregung) ist Gegenstand der numerischen Simulation. Es handelt es sich dabei um sog. first principles Simulationen, in denen die vollständige Plasma- und Felddynamik ohne Approximation abgebildet wird. Der Rechenaufwand ist damit extrem hoch. Oft müssen die Bahnen von Hunderten von Millionen



**Erion Gjonaj** arbeitet als Nachwuchsgruppenleiter am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder der TU Darmstadt.



**Thomas Weiland** ist Professor für das Fach Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt und forscht seit über drei Dekaden auf dem Gebiet der numerischen Berechnung elektromagnetischer Felder.



**Abbildung 3**  
PWFA mit Selbstinjektion und einem Elektronenstrahl als Anregungspuls. Gezeigt wird die numerisch berechnete Plasmaladungsdichte zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Plasmaelektronen bündeln sich im hinteren Teil der Plasmablase zu zwei neuen Elektronenbündeln, die im Wakefeld des Anregungspulses beschleunigt werden.

ANZEIGE



## KLEINE DINGE, GROSSE WIRKUNG

Wo sich kluge Köpfe treffen, werden oft bahnbrechende Ideen geboren. Und manchmal sind es nur relativ kleine Dinge, die den Ausschlag für eine große Idee geben: Inspirierende Architektur, die perfekte Präsentationstechnik, eine Atmosphäre einfach zum Wohlfühlen.

Das darmstadtium wissenschaft|kongresse –  
Treffpunkt für die Macher der Märkte von morgen.



**darmstadtium**  
wissenschaft|kongresse  
www.darmstadtium.de

von Plasmatelchen „getrackt“ und ebenso viele numerische Unbekannte des elektromagnetischen Feldes berechnet werden. Abbildung 3 zeigt das Beispiel einer PWFA Simulation, die unter Einsatz eines massiv parallelen Hochleistungsrechners durchgeführt wurde [9]. Deutlich in der Abbildung zu sehen ist die Entstehung der „bubble“ sowie die Selbstinjektion; in diesem Fall zweier unabhängiger Elektronenpakete hoher Ladungsdichte.

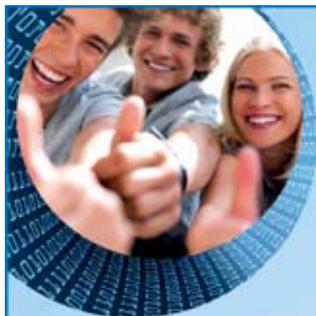
### Komplexe Experimente

Viele Ideen für zukünftige Entwicklungen zeichnen sich bereits heute ab. Eine solche Idee ist die Kaskadierung mehrerer PWFA-Beschleunigungsstufen um den Energiezuwachs zu maximieren („staging“). Denkbar ist auch die Kombination von PWFA und herkömmlicher Beschleunigertechnik, um die Vorteile beider optimal auszunutzen. Schließlich wird der numerischen Simulation auch in Zukunft eine entscheidende Rolle zum verbesserten Verständnis der nichtlinearen Plasmaprozesse in immer komplexer werdenden PWFA Experimenten zukommen.

### Literatur

- [1] Tajima, T., Dawson, J.M. (1979: Laser Electron Accelerator; Phys. Rev. Lett. 43)
- [2] Chen et al., P. (1985: Acceleration of Electrons by the Interaction of a Bunched Electron Beam with a Plasma; Phys. Rev. Lett., 54)
- [3] Pukhov, A., Meyer-ter-Vehn, J. (2002: Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime; Appl. Phys. B 74)
- [4] Faure et al., J. (2004: A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams; Nature 431, 541-544)
- [5] Mangles et al., S.P.D. (2004: Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions; Nature 431)
- [6] Geddes et al., C.G.R. (2004: High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding; Nature 431)
- [7] Leemans et al., W.P. (2006: GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator, Leemans et al.; Nature Physics 2)
- [8] Schlenvoigt et al., H.-P. (2008: A compact synchrotron radiation source driven by a laser-plasma wakefield accelerator; Nature physics 4)
- [9] Gjonaj, E., Weiland, T. (2010: Particle Based PWFA Simulations using a Discontinuous Galerkin Approach; Proceedings of ICEAA 2010, Sydney, Australia)

—ANZEIGE



Creating safety.  
With passion.

**NewTec**

System-Entwicklung und Beratung

## NewTec – ein Gewinn von Anfang an.

Als einen von unseren Kunden geschätzten Technologie- und Entwicklungspartner setzt die NewTec GmbH auf Mitarbeiter, die eigenes unternehmerisches Handeln zeigen, ohne das gemeinsame Ziel aus den Augen zu verlieren.

### Wir suchen Sie, für unsere Standorte

Mannheim, Pfaffenhofen, Freiburg und Friedrichshafen

Sie sind Absolvent der Fachrichtungen:

**Elektro- , Nachrichtentechnik, Informatik und Medizintechnik**

Dann bewerben Sie sich initiativ bei uns.

NewTec ist immer an Jungingenieuren in den Bereichen Testengineering, Hard- und Softwareentwicklung interessiert.

**i** Die NewTec GmbH ist seit über 25 Jahren Systemhaus für Beratung und Entwicklung sicherheitsrelevanter Systeme in den Branchen Avionik, Medizintechnik, Automotive und Verteidigungstechnik.

### NewTec GmbH

System-Entwicklung und Beratung

Buchenweg 3

89284 Pfaffenhofen a. d. Roth

Tel. 07302 9611-42

svenja.notz@newtec.de

[www.newtec.de](http://www.newtec.de)

# Bessere Synchrotron-Magnete durch simulationsbasierte Optimierung

Während die numerische Optimierung von kontinuierlichen Parametern supraleitender Magnete basierend auf elektromagnetischen Feldsimulationen trotz hoher Rechenzeitanforderungen schon fast alltäglich ist, stellt die für ein optimales Design notwendige, simultane Berücksichtigung auch diskreter Parameter und der damit verbundene, hohe zusätzliche Rechenaufwand enorme Schwierigkeiten dar. Eine neue, methodische Vorgehensweise zu deren Überwindung wird vorgestellt und zur Entwicklung von besonders leistungsfähigen, supraleitenden Magneten für das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR erfolgreich angewendet.

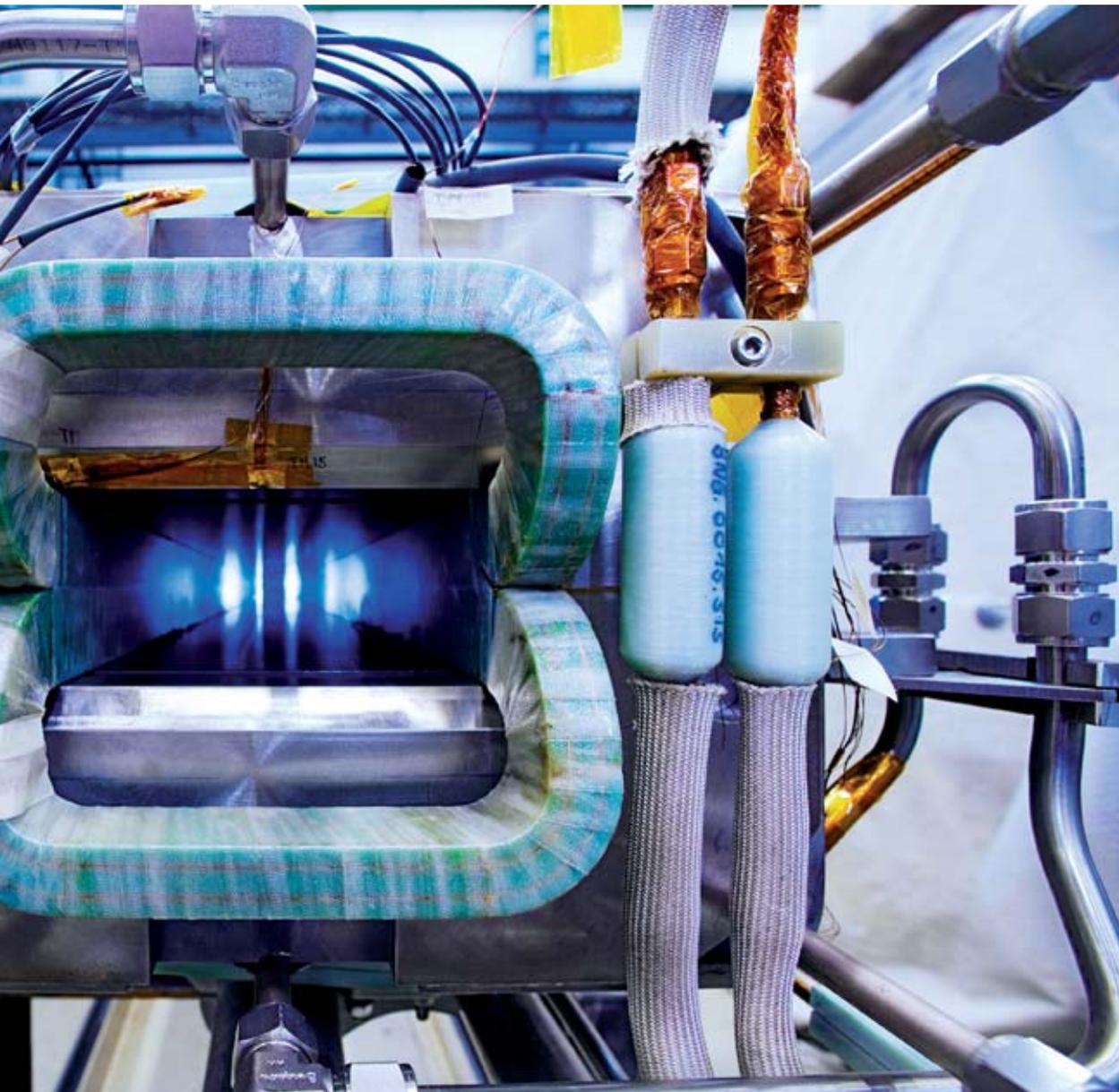
## ► Simulation Based Optimization for Improved Synchrotron Magnets

*While the numerical optimization of continuous parameters of superconductive magnets using electromagnetic field simulation is already almost standard despite the high computational cost involved, recent work has shown that also discrete parameters must be considered simultaneously. The resulting enormous increase in computational costs poses a big challenge. To overcome this a new methodological approach is presented and applied successfully to the design optimization of efficient superconductive magnets for the new accelerator facility FAIR.*

**Thomas Hemker, Herbert De Gersem, Stephan Koch, Oskar von Stryk** • Numerische Verfahren zur Design-Optimierung basierend auf rechenzeitintensiven, technischen Simulationen werden in den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen häufig angewendet. Diese bieten das Potential der systematischen Berechnung von Designvarianten, die wesentlich leistungsfähiger sind, als diese durch Ausprobieren oder Intuition allein gefunden werden können. Dennoch besitzen die in den jeweiligen Anwendungsbereichen verwendeten Simulationsprogramme in vielen Fällen keine geeigneten Schnittstellen, um effiziente (und meist gradientenbasierte), simulationsbasierte Optimierungsverfahren einzusetzen. Dies liegt daran, dass die häufig über Jahre oder Jahrzehnte entwickelten Simulationsprogramme meist nur als Black-Box angebunden werden können, die für die Eingabe veränderter Werte kontinuierlicher (d. h. reellwertiger) Optimierungsvariablen nur Funktionswerte als Ausgabe liefern. Typischerweise kann ein Optimierungsverfahren hier weder auf interne, strukturelle noch andere, analytische



Informationen und Variablen des untersuchten Systems zugreifen. Darüber hinaus unterliegen die Berechnungsergebnisse solcher Simulationsprogramme häufig noch störenden Einflüssen wie Rauschen, Rundungen oder Unstetigkeiten,

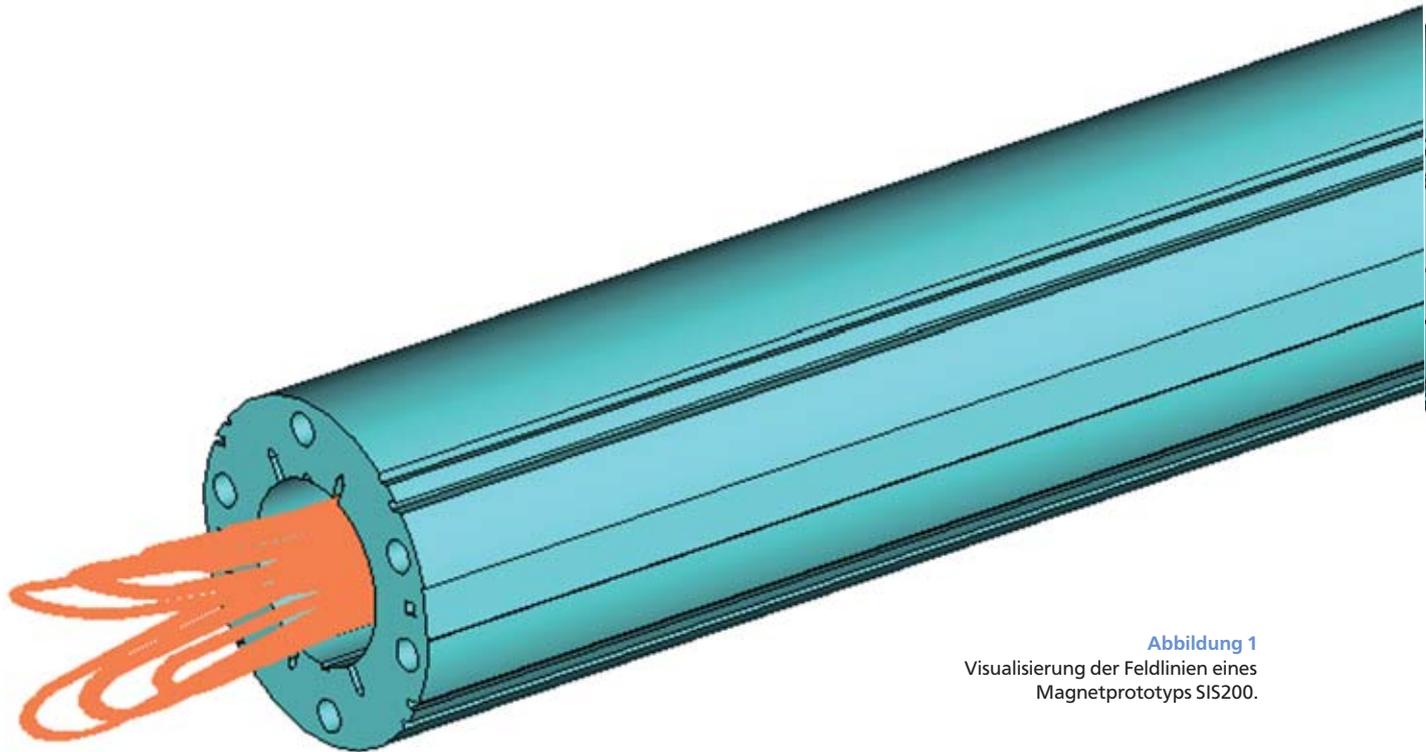


Supraleitender  
Synchro-Magnet  
SIS100 für GSI FAIR.

deren Ursprünge tief in den teilweise hochkomplexen bestehenden Simulationsprogrammen zu suchen sind.

Der Preis für die nur sehr lose Kopplung zwischen Simulationsprogramm und Optimierungsverfahren

sind sehr hohe Rechenzeiten für viele Funktionsauswertungen, d. h. Aufrufe der Simulationsprogramme. Dies wird zusätzlich erheblich erschwert, wenn neben kontinuierlichen auch diskrete (d. h. ganzzahlige oder binäre) Optimierungsvariablen



**Abbildung 1**  
Visualisierung der Feldlinien eines  
Magnetprototyps SIS200.

simultan mit berücksichtigt werden müssen, da diese die Qualität des Ergebnisses wesentlich beeinflussen, denn für diese Nicht-Standard-Problemlösungen existieren bisher keine effizienten Optimierungsverfahren. Daher werden am Fachgebiet SIM Optimierungsverfahren entwickelt, die die effiziente Optimierung kontinuierlicher und diskre-

ter Entwurfsparameter bei hochgradig rechenintensiven Simulationsprogrammen ermöglichen.

#### **Entwicklung supraleitender Synchrotron-Magnete**

Unter Führung des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung wird das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) als Erweiterung der bisherigen Anlagen nahe Darmstadt entstehen. Dabei wird das Design der dort zum Einsatz kommenden, neu entwickelten Synchrotron-Magnete wesentlich für die Leistungsfähigkeit der Anlage sein.

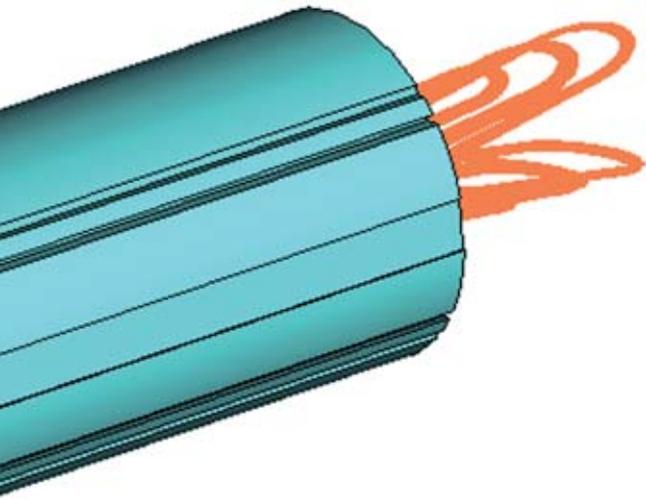
Die Qualität eines solchen supraleitenden Magneten kann durch Untersuchung des elektromagnetischen Feldes bestimmt werden, wobei hier die berechnete Homogenität des Magnetfeldes im Zentrum des Magneten als Maß dient. Um potentielle Designs für die Magneten zu entwickeln und noch vor dem Bau eines Magneten bewerten zu können, werden komplexe Simulationsmethoden eingesetzt. Zunächst wird ein CAD-Modell erstellt, das die geometrischen Ei-

#### **Literatur**

2007: T. Hemker, H. De Gerssem, O. von Stryk, T. Weiland, Mixed-Integer Nonlinear Design Optimization of a Superconductive Magnet, In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, pp. 1110-1113

2009: T. Hemker, Derivative Free Surrogate Optimization for Mixed-Integer Nonlinear Black Box Problems in Engineering, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 797, VDI Verlag

2009: S. Koch, J. Trommler, H. De Gerssem, T. Weiland, Modeling Thin Conductive Sheets Using Shell Elements in Magnetoquasistatic Field Simulations, In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 3, pp. 1292-1295



genschaften des Synchrotron-Magneten beschreibt. Die optimale Platzierung der Spulenwicklungen ist grundlegend für die Qualität des daraus resultierenden Magnetfeldes und damit auch für die korrekte Funktion des Synchrotrons. Die Modellierung ist automatisiert, durch die Übergabe von diskreten und reellwertigen Parameterwerten wird das Modell des Magneten bereits vollständig beschrieben. Für die spätere Einbindung an ein numerisches Optimierungsverfahren ist dies essentiell.

Auf Basis des CAD-Modells wird ein Gitternetzmodell des Magneten erstellt, das für die numerische Simulation der elektromagnetischen Felder per Finite-Elemente-Methode benötigt wird. Die Design-Parameter des geometrischen Modells ermöglichen so direkten Einfluss auf die Qualität des Feldes als Ergebnis der numerischen Simulation zu nehmen. Jede neue Variation der Design-Parameter erfordert eine weitere, sehr rechenzeitintensive Simulation. Zu deren Reduktion wird die Simulation zunächst auf eine repräsentative 2D-Simulation des Magnetquerschnitts angewendet, von dem aus Symmetriegründen nur ein Viertel simuliert werden muss. Durch aktuelle Entwicklung bei den Simulationsverfahren und bessere Ausnutzung paralleler Hochleistungsrechnerarchitekturen durch effiziente verteilte Prozesse können künftig auch komplexere 3D-Strukturen für eine simulationsbasierte Optimierung berücksichtigt werden.

### Gemisch diskret-kontinuierliche Optimierungsaufgaben

Die besondere Schwierigkeit des Optimierungsproblems liegt darin, dass reellwertige (wie die geometrischen Positionen der einzelnen Spulen) und ganzzahlige Optimierungsvariablen (wie die Anzahl der Wicklungen pro Spule) simultan berücksichtigt werden müssen, um möglichst effizient ein möglichst gutes Magnetdesign durch Betrachtung strukturell unterschiedlicher Magnetmodelle bestimmen zu können. Die separate, numerische Lösung von einzelnen, rein kontinuierlichen Optimierungsproblemen für jede mögliche Ausprägung der ganzzahligen Optimierungsvariablen wäre mit exorbitant hohem Rechenaufwand verbunden.

Für eine effiziente Durchführung der numerischen Optimierung werden die aus den Simulationsberechnungen resultierenden Funktionsauswertungen durch sukzessive verbesserte Surrogat-Funktionen ersetzt, die mit Hilfe von stochastischen Approximationsverfahren erstellt werden. Die resultierenden Ersatz-Optimierungsprobleme können dann unter Berücksichtigung der hier geltenden, rein geometrischen Beschränkungen für das Magnetdesign besonders effizient gelöst werden. Die Surrogat-Funktionen liefern mathematische Ableitungsinformationen mit, so dass effiziente, gradientenbasierte Optimierungsverfahren angewendet werden können. Dies ist möglich, da die Surro-

#### Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik

Prof. Dr. Oskar von Stryk  
Tel. 06151/16-4899  
E-Mail: [stryk@sim.tu-darmstadt.de](mailto:stryk@sim.tu-darmstadt.de)  
[www.sim.tu-darmstadt.de](http://www.sim.tu-darmstadt.de)

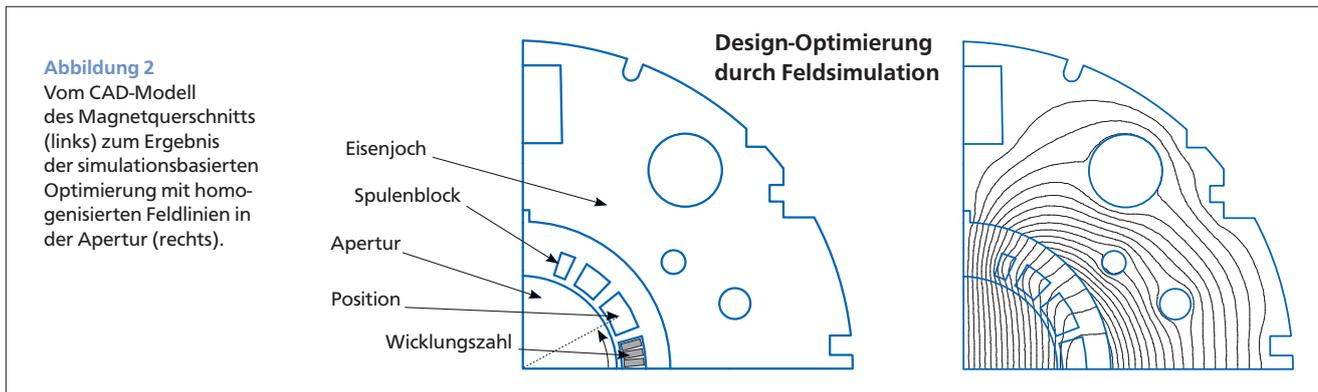
Dr.-Ing. Thomas Hemker  
Tel. 06151/16-4899  
E-Mail: [thomas@hemker.com](mailto:thomas@hemker.com)  
[www.sim.tu-darmstadt.de](http://www.sim.tu-darmstadt.de)

#### Wave Propagation and Signal Processing Research Group, Katholieke Universiteit Leuven

Prof. Dr. Ir. Herbert De Gerssem  
Tel. +32 (0)56 246134  
E-Mail: [Herbert.DeGerssem@kuleuven-kortrijk.be](mailto:Herbert.DeGerssem@kuleuven-kortrijk.be)

#### Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder

Dr.-Ing. Stephan Koch  
Tel. 06151/16-2361  
E-Mail: [koch@temf.tu-darmstadt.de](mailto:koch@temf.tu-darmstadt.de)  
[www.temf.de](http://www.temf.de)



gat-Funktionen auch außerhalb des durch die Simulationsprogramme auswertbaren Bereichs wohl definiert sind, denn zur Berücksichtigung der ganzzahligen Optimierungsvariablen werden diese relaxiert, so dass ein Branch-and-Bound-Verfahren zusammen mit einem nichtlinearen Optimierungsverfahren angewendet werden kann.

Damit eine Lösung des Ersatz-Problems auf das ursprüngliche simulationsbasierte Optimierungsproblem übertragen werden kann, müssen die wesentlichen Charakteristiken mit Hilfe der stochastischen Approximation erfasst worden sein. Dazu werden iterativ genau die Designvarianten numerisch simuliert, die für das Ersatz-Problem schon gute Ergebnisse erzielt haben. Mit Hilfe von Fehlerschätzern wird gewährleistet, dass der Raum für zulässige Designvarianten weiträumig exploriert wird. Auf Basis der so gewonnenen Er-

gebnisse können die Surrogat-Funktionen jeweils genau in den Bereichen sequentiell verfeinert werden, die vielversprechend für gute Designs sind.

#### Optimierte Designs

Durch numerische Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Optimierung unter Berücksichtigung der zusätzlichen diskreten Designparameter keinen höheren Rechenaufwand erfordert, als wenn nur die rein kontinuierlichen Parameter betrachtet werden. Mit Hilfe des auf Surrogat-Funktionen beruhenden Optimierungsansatzes konnten Designvarianten für die Magneten bestimmt werden, die nahe an die theoretisch bestmögliche Homogenität des Magnetfeldes herankommen. Die Übertragung und Anwendung der hierbei entwickelten Optimierungsverfahren auf andere simulationsbasierte Designaufgaben in anderen Bereichen ist möglich.



**Thomas Hemker** forscht auf dem Gebiet der gemischt ganzzahligen Optimierung zur Anwendung bei Simulationsprogrammen, Blackbox-Systemen und in der Robotik.



**Oskar von Stryk** leitet das Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik (FG SIM) am Fachbereich Informatik. Die Forschung in der Robotik wurde mehrfach international ausgezeichnet.



**Herbert De Gersem** forscht auf dem Gebiet der elektromagnetischer Feldberechnungen zur Anwendung in der Beschleunigertechnik und der elektrischen Energietechnik. Er ist mittlerweile an die KU Leuven in Belgien berufen worden.



**Stephan Koch** leitet am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder an der TU Darmstadt eine Nachwuchsforschergruppe. Seine Forschungsinteressen sind Berechnungsverfahren für elektromagnetische Felder.



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# Schon Einstein empfahl uns ...



Bild: Katrin Binner

## **Forschen, studieren, arbeiten an einer der besten Technischen Universitäten Deutschlands**

Wir sind eine autonome Universität und leben Eigenverantwortlichkeit und Veränderungsbereitschaft. So schaffen wir Freiräume für Kreativität und Begeisterung. Wir erarbeiten uns weltweit hohe Reputation

durch Bildung, Forschung und unsere Antworten auf entscheidende Zukunftsfragen. Wir konzentrieren uns auf Technik – aus der Perspektive der Ingenieur-, Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften.

[www.tu-darmstadt.de](http://www.tu-darmstadt.de)

# Herausforderungen

## zukünftiger Mobilkommunikation

Dem steigenden Bedarf nach mobilem Zugang zu einer breitbandigen Informationsinfrastruktur muss in zukünftigen Kommunikationssystemen Rechnung getragen werden. Um dies zu ermöglichen, müssen die Ressourcen wie etwa die Frequenzbänder noch effizienter ausgenutzt werden. Darüber hinaus muss die räumliche Ressource mit Hilfe von Mehrantennen-Systemen berücksichtigt werden. Entfernungs- und Abschattungsprobleme lassen sich zukünftig durch den Einsatz von Multi-Hop Übertragungen umgehen. Um eine effiziente Übertragung zu gewährleisten, benötigen diese Ansätze verstärkt den Einsatz mathematischer Optimierung.

### ► Challenges in Future Mobile Communication

*The rising demand for mobile access to a broadband information infrastructure has to be accommodated in future communication systems. To accomplish this, the resources such as the frequency bands have to be utilized more efficiently. Furthermore, the spatial resource must be considered using multiple antennas systems. Applying multi-hop transmissions, problems due to large distances or shadowing can be avoided in the future. To ensure an efficient transmission, these approaches increasingly require the use of mathematical optimization.*

**Anja Klein, Abdelhak Zoubir, Stefan Ulbrich, Holger Degenhardt, Fiky Y. Suratman, Alexander Kühne** • In den letzten Jahrzehnten konnten auf dem Gebiet der drahtlosen Kommunikation große Fortschritte erzielt werden, denen es zu verdanken ist, dass mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung drahtlos kommunizieren kann und moderne Kommunikationssysteme zunehmend mobilen Zugang zu einer breitbandigen Informationsinfrastruktur ermöglichen. Zukünftig sollen darüber hinaus unterschiedlichste Funktionalitäten mit Hilfe von massiv vernetzten, drahtlosen Sensor- und Kommunikationssystemen mobil bereitgestellt werden, um somit unsere Lebens- und Arbeitswelt weiter zu erleichtern. Die dazu notwendigen Sensoren, die Daten oder Signale aufnehmen, auswerten und weitersenden, sind zugleich Sender und Empfänger, sogenannte Transceiver. Diese Form vernetzter Kommunikation schafft durch die Auswertung der anfallenden Daten einen Mehrwert für alle Teilnehmer. So ergeben sich vielfältige neuartige Anwendungen, wie intelligente häusliche Umgebungen (smart home) und intelligente Transportsysteme (smart trans-

port). Aber auch auf mobile Netze zugeschnittene smarte Systeme sind denkbar. So könnten etwa Verkehrsstaus durch die Kommunikation von Auto zu Auto (Car-to-Car) oder von Auto zur Umgebung (Car-to-X) vermieden werden. Des Weiteren könnte die mobile Sensorkommunikation in der Gesundheitsüberwachung eingesetzt werden. Sensoren am Körper eines Patienten könnten dessen Gesundheitszustand erfassen und gegebenenfalls einen automatischen Notruf absetzen.

Um eine derart vernetzte Mobilkommunikation zu ermöglichen, ist eine Infrastruktur notwendig, in der sämtliche Geräte in einer kooperativen Weise drahtlos miteinander kommunizieren können.

Insbesondere muss hierbei die Mobilität der Sensoren berücksichtigt werden, da sich in einem Netzwerk die Position der Sensoren ständig verändern kann, bzw. neue Sensoren hinzu kommen und andere sich abmelden können. Sensoren müssen daher derart ausgelegt werden, dass sie sensitiv auf die sich verändernde Umgebung reagieren, um eine flexible und doch effiziente Empfangs- und Sendequalität zu gewährleisten. Eine weitere Herausforderung stellt die Bereitstellung von flexiblen Netzwerkarchitekturen dar, die eine interferenzresistente, kooperative und energieeffiziente drahtlose Kommunikation ermöglichen sollen.

Im folgenden werden exemplarisch zwei dieser Fragestellungen, die im Rahmen von Computational Engineering untersucht werden, aufgegriffen und neuartige Lösungsansätze aufgezeigt, die sich den Einsatz mathematischer Optimierung zu Nutze machen.

#### Cognitive radio

In zukünftigen drahtlosen Sensor- und Kommunikationssystemen wird der Bedarf an Frequenzbändern im Spektrum erwartungsgemäß ansteigen, weil fortlaufend neue drahtlose Dienste angeboten werden. Da allerdings bereits ein Großteil des ver-

#### XOR Kombination zweier Bits a und b

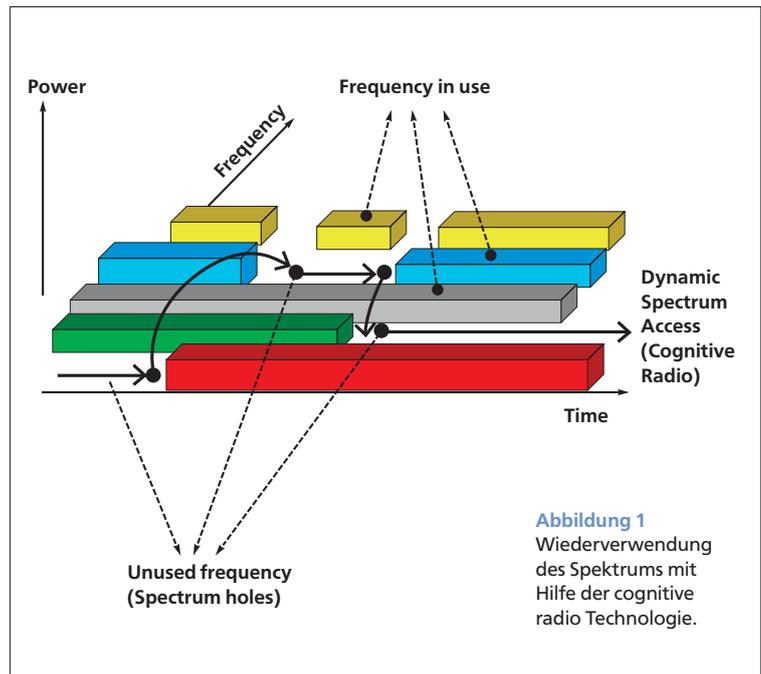
a=1, b=1 → 0

a=1, b=0 → 1

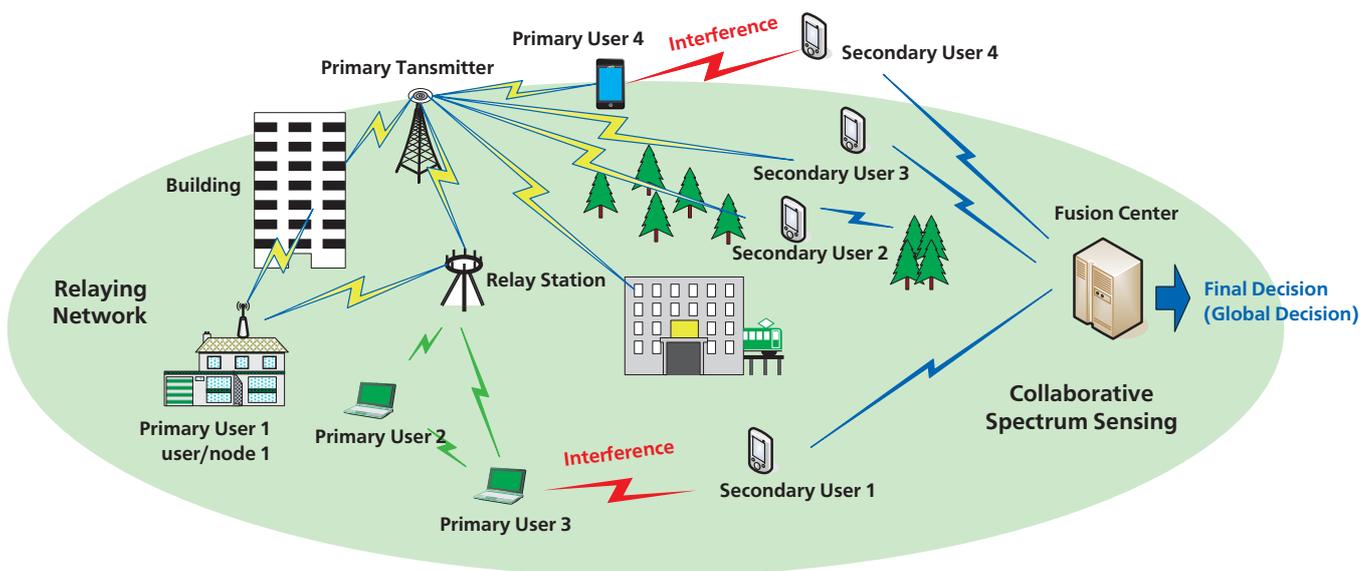
a=0, b=1 → 1

a=0, b=0 → 0

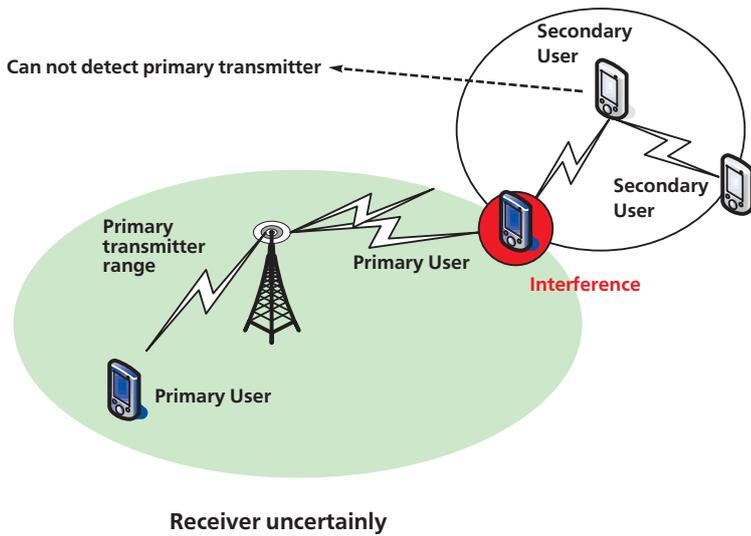
fügbaren Spektrums allokiert ist, wird es zunehmend schwieriger, freie Frequenzbänder für neue Anwendungen zu finden. Auf der anderen Seite zeigen Messungen, dass große Teile des allokierten Spektrums nicht voll ausgenutzt werden. Dies motiviert das Konzept der Wiederverwendung des Spektrums, damit sekundäre Nutzer jene Frequenzbänder verwenden können, die gerade nicht von den lizenzierten, primären Nutzern beansprucht werden. Die Schlüsseltechnologie hinter der Wiederverwendung des Spektrums ist dynamic spectrum access oder die cognitive radio Technologie. Um die cognitive radio Technologie funktional umzusetzen, muss jeder sekundäre Nutzer in der Lage sein, das Spektrum zu messen und zu entscheiden welche spektralen Löcher für die Verwendung durch sekundäre Nutzer zur Verfügung stehen (siehe Abbildung. 1). Eine große Herausforderung stellt dabei das versteckte terminal Problem dar, welches sich ergibt, wenn der sekundäre Nutzer außerhalb der Reichweite des primären Nutzers ist oder beispielsweise durch Gebäude abgeschattet wird (Abbildung 2).



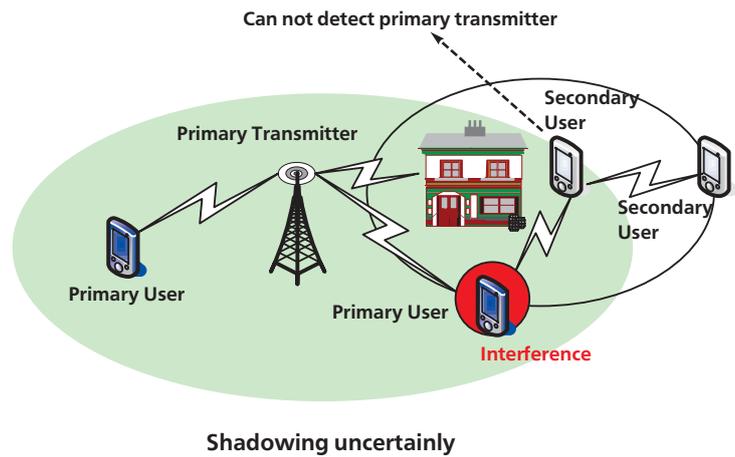
**Abbildung 1**  
Wiederverwendung des Spektrums mit Hilfe der cognitive radio Technologie.



Relais-Netzwerke und Wiederverwendung des Spektrums.



**Abbildung 2**  
Verstecktes  
Terminal-Problem.



Wenn die Entscheidung des sekundären Nutzers auf gemessenen schwachen Signalen basiert, werden regelmäßig falsche Entscheidung zu freien Frequenzbändern getroffen und primäre Nutzer werden gestört. Aus diesem Grund sind für eine zuverlässige Erfassung des Spektrums auch andere Entscheidungen von Nutzern in der lokalen Umgebung notwendig. Dies wird als gemeinschaftliche Erfassung des Spektrums bezeichnet.

In der gemeinschaftlichen Erfassung des Spektrums hat jeder sekundäre Nutzer eine lokale Entscheidungsregel und leitet die lokal gewonnene Information zu einem Fusionszentrum weiter, welches wiederum, basierend auf einer Fusionsregel, eine finale Entscheidung zu der Verfügbarkeit des Frequenzbands trifft. Der Entwurf einer optimalen lokalen Entscheidungsregel und Fusionsregel ist hierbei eine große Herausforderung. Das Optimierungsproblem beinhaltet die Bestimmung eines optimalen Schwellwerts für die lokale Entscheidung und die Minimierung einer globalen Risikofunktion für die finale Entscheidung. Da eine gleichzeitige Optimierung der lokalen Entscheidungsregel und Fusionsregel zu einem komplexen und möglicherweise unlösbaren Problem führen kann, sind heuristische Ansätze notwendig. Beispielsweise können die lokalen Entscheidungen vorsezifiziert werden, so dass ausschließlich die Fusionsregel optimiert wird. Dies kann durch eine lineare Kombination der lokal gemessenen Signalenergie geschehen



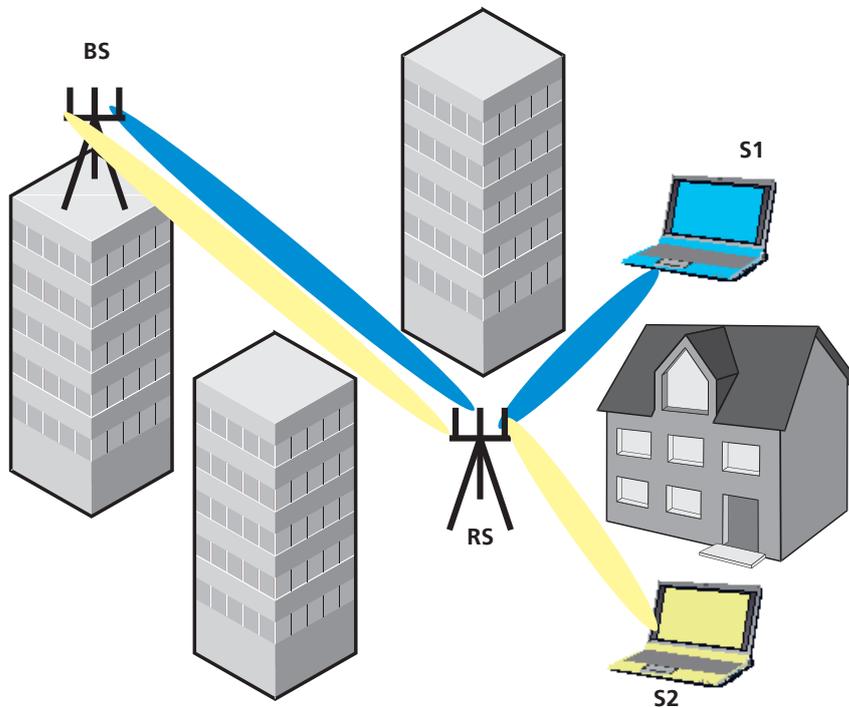
**Prof. Dr. Anja Klein** ist Leiterin des Fachgebiets Kommunikationstechnik im Institut für Nachrichtentechnik, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik. Ihre Forschungsinteressen liegen in den Bereichen Vielfachzugriff, Relaying und kooperative Kommunikation in zukünftigen Mobilkommunikationssystemen und drahtlosen Multihop-Netzwerken.



**Prof. Dr. Stefan Ulbrich** leitet das Fachgebiet Nichtlineare Optimierung am Fachbereich Mathematik und ist Principal Investigator an der Graduate School Computational Engineering.



**Prof. Dr. Abdelhak Zoubir** ist Leiter des Fachgebiets Signalverarbeitung im Institut für Nachrichtentechnik, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der statistischen Methoden für die Signalverarbeitung und deren Anwendung in der Kommunikationstechnik, im Radar, Sonar sowie in der Biomedizin.



**Abbildung 3**  
 Mehrnutzer  
 Mehrantennen  
 Relais-Netzwerk.

### Kommunikation in Relais-Netzwerken

Noch stoßen die aktuellen Mobilfunknetze an ihre Grenzen, wenn viele Nutzer gleichzeitig zum Beispiel Video-Dienste abrufen wollen und große Entfernungen oder Hindernisse überwunden werden müssen. Relais-Netzwerke mit Relaisstationen sowie der Einsatz von Mehrantennensystemen zeigen sich hier als kostengünstige und vielversprechende Lösungen. Betrachtet man das Szenario aus Abbildung 3, so können durch mehrere Antennen an



**Holger Degenhardt** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Kommunikationstechnik und Kollegiat der Graduate School of Computational Engineering, Technische Universität Darmstadt. Einer seiner Forschungsschwerpunkte ist die Kommunikation in Relais-Netzwerken.



**Fiky Y. Suratman** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Signalverarbeitung und Kollegiat der Graduate School of Computational Engineering, Technische Universität Darmstadt. Einer seiner Forschungsschwerpunkte ist Cognitive Radio.



**Alexander Kühne** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Kommunikationstechnik an der TU Darmstadt. Einer seiner Forschungsschwerpunkte sind drahtlose Sensor-Netzwerke.

**Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Kommunikationstechnik  
 Prof. Dr. Anja Klein  
 Tel 06151/16-5156  
 E-Mail: a.klein@nt.tu-darmstadt.de  
[www.kt.tu-darmstadt.de](http://www.kt.tu-darmstadt.de)

**Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Nichtlineare Optimierung  
 Prof. Dr. Stefan Ulbrich  
 Tel. 06151/16-2487  
 E-Mail: ulbrich@mathematik.tu-darmstadt.de  
[www.mathematik.tu-darmstadt.de](http://www.mathematik.tu-darmstadt.de)

**Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Signalverarbeitung  
 Prof. Dr. Abdelhak Zoubir  
 Tel. 06151/16-4595  
 E-Mail: zoubir@spg.tu-darmstadt.de  
[www.nt.tu-darmstadt.de/spg](http://www.nt.tu-darmstadt.de/spg)

**Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Kommunikationstechnik  
 Dipl.-Ing. Holger Degenhardt,  
 Tel. 06151/16-3669  
 E-Mail: h.degenhardt@nt.tu-darmstadt.de  
[www.kt.tu-darmstadt.de](http://www.kt.tu-darmstadt.de)

**Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Signalverarbeitung  
 M. Sc. Fiky Y. Suratman  
 Tel. 06151/16-2814  
 E-Mail: fsurat@spg.tu-darmstadt.de  
[www.nt.tu-darmstadt.de/spg](http://www.nt.tu-darmstadt.de/spg)

**Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt**  
 Fachgebiet Kommunikationstechnik  
 Dr.-Ing. Alexander Kühne  
 Tel. 06151/16-5572  
 E-Mail: a.kuehne@nt.tu-darmstadt.de  
[www.kt.tu-darmstadt.de](http://www.kt.tu-darmstadt.de)

der Relais- und an der Basisstation die Signale der Nutzer räumlich getrennt werden. Dies ermöglicht den Nutzern, gleichzeitig über dieselben Ressourcen zu kommunizieren.

Weiterhin können nun spezielle Netzwerkkodierungen verwendet werden, um die erzielbaren Datenraten weiter zu steigern. Senden alle Nutzer und die Basisstation in einer ersten Phase gleichzeitig ihre Datenströme zur Relaisstation, so können dort die Datenströme zunächst dekodiert werden, um anschließend eine Fehlerkorrektur durchzuführen. Anschließend könnte die Relaisstation die neu codier-

ten Datenströme räumlich getrennt an die gewünschten Empfänger senden, doch würden hierbei unnötig Ressourcen verschwendet. Kombiniert man hingegen die Datenströme eines Kommunikationspaares zum Beispiel durch eine XOR-Kombination, so kann ein gemeinsamer Datenstrom gesendet werden wodurch die Sendeleistung der Relaisstation effizienter genutzt werden kann. Die Empfänger können anschließend die gewünschten Datenströme zurückgewinnen, indem sie die empfangenen Datenströme nochmals mit dem eigenen Sendesignal XOR-kombinieren.

ANZEIGE



PUMPEN + SYSTEME



## MEMBRANPUMPEN-TECHNOLOGIE VOM FEINSTEN

- Ob für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten – KNF Neuberger bietet ein breites Angebot an Pumpen und Systemen.
- Für unverfälschtes Fördern, Dosieren, Komprimieren und Evakuieren.
- Als OEM- oder tragbare Ausführungen.
- Mit einem variablen Produktprofil für kundenspezifische Lösungen.

- Für anspruchsvolle Anwendungen z.B. in den Bereichen:
- Medizintechnik
- Analysetechnik
- Verfahrenstechnik
- Lebensmitteltechnik
- Labortechnik
- Reprotechnik
- Energietechnik
- Forschung











www.knf.de

KNF Neuberger GmbH

Alter Weg 3 | D 79112 Freiburg | Tel. 07664/5909-0 | Fax -99 | E-Mail: info@knf.de



Bei Intergraph Process, Power & Marine (PP&M) setzen wir uns ein für Innovation und sind maßgeblich beteiligt an der Entwicklung der Zukunft von hochwertigen Engineering-Softwarelösungen für den Anlagenbau.

[www.intergraph.de/careers](http://www.intergraph.de/careers)



Intergraph und das Intergraph Logo sind eingetragene Warenzeichen der Intergraph Corporation.  
©2011 Intergraph (Deutschland) GmbH, Ismaning.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Signale der Nutzer nur räumlich zu filtern und weiterzuleiten. Durch die Art der räumlichen Filterung können hier ebenfalls gezielt Kombinationen zwischen den einzelnen Datenströmen erzeugt werden. Auch in diesem Verfahren verwendet jeder Nutzer anschließend die Kenntnis seines eigenen Sendesignals, um den für ihn bestimmten Datenstrom mit möglichst geringen Störeinflüssen zu empfangen. Damit diese Trennung von Nutzern robust gegenüber Störungen ist und hohe Datenraten erzielt werden können, müssen sowohl die räumlichen Filter an der

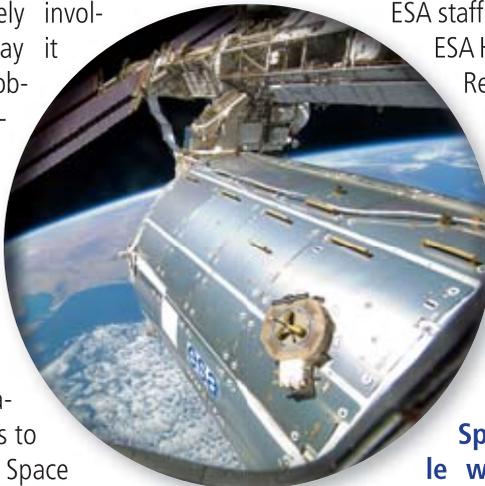
Relaisstation als auch an der Basisstation an die aktuellen Kanäle zwischen den Stationen angepasst werden. Eine optimale Lösung kann im Fall bidirektionaler Kommunikation nur durch komplexe mehrdimensionale numerische Lösungsverfahren bestimmt werden, doch da in einem Mobilfunksystem die Kanäle ständig zeitlich variieren, wäre eine solche Anpassung in der Realität zu langsam. Deshalb werden analytische Näherungen bestimmt, um auch in einem realen System eine Nutzer-trennung zu gewährleisten und hohe Datenraten zu erzielen.

ANZEIGE



From the beginnings of the 'space age', Europe has been actively involved in spaceflight. Today it launches satellites for Earth observation, navigation, telecommunications and astronomy, sends probes to the far reaches of the Solar System, and cooperates in the human exploration of space.

Space is a key asset for Europe, providing essential information needed by decision-makers to respond to global challenges. Space provides indispensable technologies and services, and increases our understanding of our planet and the Universe.



Since 1975, the European Space Agency (ESA) has been shaping the development of this space capability. By pooling the resources of 19 Member States, ESA undertakes programmes and activities far beyond the scope of any single European country, developing the launchers, spacecraft and ground facilities needed to keep Europe at the forefront of global space activities.

ESA staff are based at several centres of expertise: ESA Headquarters in Paris; the European Space Research & Technology Centre (ESTEC), Netherlands; the centre for Earth observation (ESRIN), Italy; the European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany; the European Astronaut Centre (EAC), Cologne, Germany; and the European Space Astronomy Centre (ESAC), Spain.

**Space programmes require people who like challenges. Our success depends on bright minds like yours!**

Visit your career universe on [www.esa.int/careers](http://www.esa.int/careers)

## Inserentenverzeichnis

<b>Devoteam</b> www.devoteam.de	Seite 14	<b>Rhode &amp; Schwarz</b> www.career.rohde-schwarz.com	Seite U2
<b>ENBW</b> www.enbw.com/karriere	Seite 31	<b>Rober Bosch</b> www.career.rohde-schwarz.com	Seite U3
<b>European Space Agency (ESA)</b> www.esa.int/careers	Seite 69	<b>schenck process</b> www.schenckprocess.com	Seite 41
<b>HEAG Süd Hessische Energie</b> www.hse.ag	Seite 30	<b>SCHENCK RoTec GmbH</b> www.schenck-rotec.de	Seite 25
<b>Infraserv, Life Gründerzentrum</b> www.kalle-albert.de	Seite 35	<b>SEW-EURODRIVE GmbH&amp;Co.KG</b> www.karriere.sew-eurodrive.de	Seite U4
<b>Intergraph Deutschland</b> www.intergraph.de/careers	Seite 68	<b>schunk edv system</b> www.schunk.net	Seite 20
<b>KNF Neuberger GmbH</b> www.knf.de	Seite 68	<b>Stellenwerk</b> www.stellenwerk-darmstadt.de	Seite 15
<b>Lufthansa Training</b> www.lufthansa-seeheim.de	Seite 31	<b>TU Darmstadt</b> www.tu-darmstadt.de	Seite 63
<b>NewTec GmbH</b> www.newtec.de	Seite 57	<b>Verivox</b> www.verivox.de	Seite 47
<b>PWT Wasser- und Abwassertechnik</b> www.pwt.de	Seite 21	<b>Wissenschafts- und Kongresszentrum</b> www.darmstadtium.de	Seite 56

## Bildnachweise

Titelfoto: Katrin Binner, S. 6 bis 9: VM: Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka, VM Prof. Dr. Kay Hamacher/Prof. Dr. Jörg Simon, VM: [www.top500.org/static/lists/2011/06/TOP500\\_201106\\_Poster.png](http://www.top500.org/static/lists/2011/06/TOP500_201106_Poster.png), VM Christian Bischof, S. 10 bis 15: Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD), Daniel Weber, Fraunhofer IGD (2), NVIDIA, S. 16 bis 21: Simuliert mit SMOVE (<http://www.graduate-school-ce.de/files2/schnep/SMOVE/>), Simuliert mit KARDOS (<http://elib.zib.de/pub/elib/codelib/kardos/>) (2), Anordnung: www.CST.com, Simuliert mit KARDOS (<http://elib.zib.de/pub/elib/codelib/kardos/>), S. 22 bis 25: Michael Kornhaas (4), S. 26 bis 31: Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, TU Darmstadt (2), Graduate School CE, TU Darmstadt, S. 32 bis 35: Fachgebiet FDY (G. Khujadze) (3), Fachgebiet FDY (V. Avsarkisov), S. 36 bis 41: Fachgebiet Energie- und Kraftwerkstechnik (4), S. 42 bis 47: Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder, TUD (2), Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder, S. 48 bis 51: NAW (4), S. 52 bis 57: Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder (4), S. 58 bis 63: (Bild: J. Guse, Bildrechte: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH), TEMF (2), S. 64 bis 69: Institut für Nachrichtentechnik der TU Darmstadt (4)

## Impressum forschen 2/2011

Herausgeber: Der Präsident der TU Darmstadt,  
Prof. Dr. Hans Jürgen Prömel  
Fachliche Beratung: Dr. Christiane Ackermann, Leiterin Dezernat Forschung  
Redaktion: Jörg Feuck, Leiter Corporate Communications  
Koordination der Autoren: Dr. Markus Lazanowski, Geschäftsführer  
Graduate School CE

Verlag: vmm wirtschaftsverlag gmbh & co. kg  
Maximilianstraße 9, 86150 Augsburg  
Gestaltung und Produktion: conclouso GmbH & Co. KG,  
Mainz  
Druck: AZ-Druck, Kempten  
Auflage: 6000

**Jeder Erfolg hat seine Geschichte.**

**125** Jahre **Bosch**  
1886–2011



**BOSCH**  
Technik fürs Leben

## Energie effizienter nutzen – Bosch Thermotechnik

**Die Bosch Thermotechnik GmbH steht für den Geschäftsbereich Thermotechnik der Bosch-Gruppe und gehört mit einem Umsatz von insgesamt 2,87 Milliarden Euro und rund 13.000 Mitarbeitern weltweit zu den führenden Anbietern von Systemen für behagliches Raumklima und warmes Wasser. Als Systemanbieter sind wir in der Lage, die unterschiedlichsten Anforderungen der jeweiligen nationalen Märkte wie auch die anspruchsvollsten Bedürfnisse unserer Kunden zu erfüllen. In 21 Fertigungsstätten in elf Ländern produzieren wir energieeffiziente Heiztechniklösungen und Warmwassergeräte, die wir in rund 50 Ländern weltweit vertreiben. Qualität, Innovationskraft und Kundenorientierung bestimmen das Handeln und die Entwicklung unseres Unternehmens. Mit unseren Produktlösungen leisten wir einen aktiven Beitrag zur effizienten Energienutzung und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.**

Erfolg in unserem Sinne bedeutet jedoch mehr als strategisches, nachhaltiges Wachstum: Wir verbinden damit eine gesellschaftliche und ökologische Verantwortung. Diese Verantwortung spiegelt sich auch in unserer Personalpolitik wider: Als Mitarbeiter/-in fördern wir Sie individuell mit gezielten Programmen und Weiterbildungen und übergeben Ihnen früh Verantwortung. Zusätzlich unterstützen wir den Wechsel

zwischen Funktions- und Geschäftsbereichen, Stab und Linie sowie In- und Ausland, damit Sie vielfältige Erfahrungen sammeln können.

Sie sehen: Wir haben viel zu geben – und wir erwarten auch viel. Bereits bei der Einstellung achten wir auf herausragende Leistungen. Dafür bieten wir Ihnen ideale Karrierebedingungen.

Der beste Zeitpunkt für Ihren Einstieg liegt ganz bei Ihnen: Für das Praktikum oder die Abschlussarbeit, als Absolvent/-in sowohl im Junior Managers Program (Führungsnachwuchsprogramm) oder Graduate Specialist Program (Fachnachwuchsprogramm) als auch im Direkteinstieg sind Sie bei uns herzlich willkommen.

Bewerben Sie sich! Wir freuen uns darauf, Sie persönlich kennen zu lernen.

**Jeder Erfolg hat seinen Anfang.**

Hier und jetzt – starten Sie mit uns.

[www.bosch-thermotechnik.de](http://www.bosch-thermotechnik.de)

Ihre Freunde wissen nicht,  
wo Bruchsal liegt?

**Sagen Sie einfach:  
an der Spitze  
der Antriebstechnologie.**



**Menschen mit Weitblick und Schaffenskraft gesucht.** Was halten Sie von einem Einstieg bei einem der führenden Spezialisten für Antriebstechnologie? Wir suchen Könner, Macher, Denker und Lenker. Menschen, die mit Kompetenz und Tatkraft Spitzenleistungen erbringen wollen, um Gutes noch besser zu machen. Menschen, die die Möglichkeiten eines weltweit erfolgreichen Unternehmens ebenso schätzen wie seine familiären Wurzeln. Menschen, die täglich Mut und Einsatz zeigen für neue Ideen: für Getriebe, Motoren und Antriebssysteme, die in Zukunft Maßstäbe setzen werden. Menschen, die Visionen haben und wissen, wie man sie verantwortungsvoll verwirklicht. Menschen, die das Ganze sehen. Menschen wie Sie? Herzlich willkommen bei SEW-EURODRIVE.