

BUW **OUTPUT**

Forschungsmagazin *Research bulletin* der Bergischen Universität Wuppertal
Nr. 12 Wintersemester 2014/2015

Detektivarbeit in luftiger Höhe – Atmosphärischen Prozessen auf der Spur
Detective work at airy heights – On the track of atmospheric processes
von / by Ralf Koppmann und / and Marc Krebsbach

Dynamik von Fußgängerströmen
Dynamics of pedestrian flows
von / by Armin Seyfried und / and Stefan Holl

Hadronenphysik mit Gittereichtheorie
Hadron physics with lattice gauge theory
von / by Andreas Frommer

Der primordiale Feuerball auf dem Supercomputer
The primordial fireball on the supercomputer
von / by Zoltan Fodor und / and Stefan Krieg

Elektronische Industrie – Mathematics inside
Electronics industry – Mathematics inside
von / by Andreas Bartel, Michael Günther und / and Jan ter Maten

Schadstoffemissionen der Luftfahrt
Pollutant emissions from aviation
von / by Peter Wiesen, Ralf Kurtenbach, Michael Gallus und / and Stefanie Ifang



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



"Erfolgreich zu sein setzt zwei Dinge voraus:
Klare Ziele und regelmäßige Weiterbildung.
Die TAW als Ihr Partner bringt Sie
WEITER DURCH BILDUNG."

Wir sind einer der führenden Anbieter von Weiterbildung in Deutschland. Unser vielfältiges Angebot umfasst über 2500 Veranstaltungen die jährlich von bis zu 30.000 Teilnehmern besucht werden. Wir bieten Ihnen Weiterbildung für sämtliche Bereiche der beruflichen Praxis an. Dies reicht von Seminaren mit technischen, rechtlichen und betriebswirtschaftlichen Inhalten bis hin zu Veranstaltungen mit Führungs-, Kommunikations- und Managementthemen.

Wir verstehen uns als Ihr Partner, dem wir in allen Fragen zum Thema Weiterbildung flexibel, lösungs- und kostenorientiert zur Seite stehen. Zu unserem Angebot gehören Tagesseminare und -trainings, berufsbegleitende Studien- und Zertifikatslehrgänge, Arbeitskreise, Workshops, Tagungen und Inhouse-Veranstaltungen. Darüber hinaus verfügen wir über langjährige Erfahrungen bei der Durchführung größerer Qualifizierungsprogramme.

Technische Akademie Wuppertal e.V.

Unsere Weiterbildungszentren finden Sie in:
Wuppertal • Altdorf b. Nürnberg • Berlin • Bochum • Cottbus • Wildau b. Berlin
Hubertusallee 18 • 42117 Wuppertal • Tel. 0202 / 7495 - 0
www.taw.de • taw@taw.de



Inhalt / Contents

04	Editorial von / by Michael Scheffel
06	Detektivarbeit in luftiger Höhe – Atmosphärischen Prozessen auf der Spur <i>Detective work at airy heights – On the track of atmospheric processes</i> von / by Ralf Koppmann und / and Marc Krebsbach
12	Dynamik von Fußgängerströmen <i>Dynamics of pedestrian flows</i> von / by Armin Seyfried und / and Stefan Holl
18	Hadronenphysik mit Gittereichtheorie <i>Hadron physics with lattice gauge theory</i> von / by Andreas Frommer
24	Der primordiale Feuerball auf dem Supercomputer <i>The primordial fireball on the supercomputer</i> von / by Zoltan Fodor und / and Stefan Krieg
30	Elektronische Industrie – Mathematics inside <i>Electronics industry – Mathematics inside</i> von / by Andreas Bartel, Michael Günther und / and Jan ter Maten
36	Schadstoffemissionen der Luftfahrt <i>Pollutant emissions from aviation</i> von / by Peter Wiesen, Ralf Kurtenbach, Michael Gallus und / and Stefanie Ifang
42	Modellierung und Simulation elektromagnetischer Felder <i>Modeling and simulation of electromagnetic fields</i> von / by Markus Clemens
45	Research News
50	Neuerscheinungen / New publications
52	Forschungseinrichtungen / Research Centers
54	Forschungsförderung / Research Funding Management

IMPRESSUM / IMPRINT

Herausgegeben im Auftrag des Rektorates vom Prorektor für Forschung, Drittmittel und Graduiertenförderung /
Issued for the Rector's Office of the University of Wuppertal by the Pro-Rector for Research, External Funding and Advanced Scientific Training

Konzeption und Redaktion /
Concept and editorial staff
Dr. Maren Wagner, Leitung
Eva Noll, Denise Habberger
Telefon 0202/439-2405
presse@uni-wuppertal.de
www.presse.uni-wuppertal.de

Produktion und Gestaltung /
Production and design
Friederike von Heyden
Universitätspressestelle

Fotos / Photos
Bergische Universität Wuppertal oder Quellennachweis /
University of Wuppertal or acknowledgement

For the English version visit
www.buw-output.de

Alle Rechte vorbehalten. / All rights reserved.
Wuppertal, November 2014 / November 2014

Prof. Dr. Michael Scheffel
Telefon 0202/439-2225
Prorektor2@uni-wuppertal.de
Gaußstraße 20
42119 Wuppertal

Übersetzung / Translation
Joseph Swann

Druck / Printers
Engelhardt GmbH, Neunkirchen

Auflage / Print run
3000 Exemplare / 3000 copies



Editorial



von / by

Prof. Dr. Michael Scheffel

Prorektor für Forschung, Drittmittel und Graduiertenförderung /
Pro-Rector for Research, External Funding and Advanced Scientific Training

Zur besonderen Qualität der Forschungsförderung in Deutschland gehört wesentlich die Institution einer „Forschungsgemeinschaft“, deren Gremien sich in einem demokratischen Prozess aus der Gemeinde der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unseres Landes organisieren. Die „Deutsche Forschungsgemeinschaft“ (DFG) bietet zahlreiche Formen der Unterstützung an. Zu ihren größten und wichtigsten Förderformaten zählen die sogenannten Sonderforschungsbereiche (SFBs). Sie können für eine Dauer von bis zu zwölf Jahren eingerichtet werden und eröffnen die Möglichkeit, im Rahmen eines fächerübergreifend angelegten Forschungsprogramms vergleichsweise langfristig zusammenzuarbeiten.

An der Bergischen Universität gibt es seit 2008 den SFB-TRR55 „Hadronenphysik mit Gittereichtheorie“, wobei der Zusatz „TRR“ für „Transregio“ steht und signalisiert, dass dieser SFB mehrere Standorte hat – in diesem Fall sind das die Universität Regensburg sowie die Karl-Franzens-Universität Graz. Welche Ziele Physiker und Mathematiker in diesem SFB verfolgen, wird im vorliegenden Heft von BUW.OUTPUT erläutert. Dabei zeigt sich einmal mehr, dass aktuelle Spitzenforschung in vielen Fällen ein weitgespanntes internationales Netzwerk erfordert und dass Grundlagenforschung auch unmittelbar praktische Folgen haben kann und hat. Im SFB-TRR55 werden so z.B. nicht nur grundlegende Beiträge zu einer Vertiefung von physikalischen Erkenntnissen im Blick auf die Theorie der Quarks als Bausteine der Materie geleistet – zugleich verkürzt man die Rechenzeit von großen Computern und entwickelt in enger Zusammenarbeit mit der Industrie und anderen Forschungszentren und Universitäten neue Spezialrechner, die u.a. weniger Strom verbrauchen.

Unter dem Thema „Messen und Simulieren“ präsentiert unser Heft weitere Projekte, die die Entwicklung theoretischer Einsichten für praktische Zwecke nutzen. MIRAH (*Measurement of Stable Isotope Ratios on HALO*), ein in Wuppertal entwickelter Luftprobensammler trägt so z.B. dazu bei, komplexen Prozessen in der Atmosphäre und damit letztlich auch den Voraussetzungen und Folgen des gegenwärtigen Klimawandels buchstäblich auf die Spur zu kommen; ein Projekt der Atmosphärenchemie hilft, die durch den Luftverkehr verursachten Luftschadstoffe zu kontrollieren. Neben Theorie und Praxis hat im Zeitalter von Hochleistungsrechnern schließlich eine dritte Methode des Erkenntnisgewinns an Bedeutung gewonnen: Die numerische Simulation, d.h. das Experiment am mathematischen Modell. Seine vielfältigen Möglichkeiten werden an mehreren Beispielen illustriert. Vorgestellt werden die rechnergestützte elektromagnetische Feldberechnung sowie Projekte, die u.a. dazu dienen, die im Blick auf die Elektromobilität so wichtige Effizienz von Energiewandlern zu steigern oder aber auch die Bewegungen von Fußgängern berechnen und die Nutzung von öffentlichen Räumen sicherer gestalten zu können. Nachrichten aus der Welt der Forschung geben schließlich Einblick in eine Vielzahl anderer bemerkenswerter Entwicklungen an der Bergischen Universität.

Ich wünsche allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre!

A key role in funding German research has long been played by the German Research Foundation, an institution whose various boards and committees are drawn democratically from the community of the nation's scholars and scientists. The foundation offers financial support in various ways, one of the most important of which is the so-called "collaborative research center". Running for up to twelve years, these centers offer a unique opportunity for relatively long-term interdisciplinary research.

Since 2008 the University of Wuppertal (UW) has been involved in the collaborative research center „Hadron Physics with Lattice Gauge Theory“, a trans-regional project based in Wuppertal and run in collaboration with the Universities of Regensburg and Graz. The present issue of BUW.OUTPUT explains what the physicists and mathematicians working on this project seek to achieve. That modern leading-edge research calls for international teams, and that inquiry into the fundamental principles of physics can and does have immediate practical results, are two facets of contemporary research that are today virtually axiomatic. The UW research center, for example, has not only opened up new insights into the theory of quarks as the building-blocks of matter, but has at the same time reduced the processing time of supercomputers and, in close cooperation with industry and other research centers and universities, facilitated the development of new, more economic computers for special purposes.

The overall topic of this issue, measurement and simulation, covers a number of other projects that put the development of theoretical insights to practical use. MIRAH (Measurement of Stable Isotope Ratios on HALO), for example, is an air sample collector

developed at UW that enables scientists to detect complex atmospheric processes and thus to understand more about the conditions and consequences of contemporary climate change. Another atmospheric chemistry project supports the monitoring and control of air traffic emissions. And in the age of the supercomputer a further powerful method of gaining knowledge has come to the fore, alongside theory and practice: numerical simulation – i.e. experimentation with mathematical models. The many possibilities of this new research dimension are illustrated here in articles on the computer-aided calculation of electromagnetic fields, as well as on projects that seek to boost the efficiency of energy converters – an essential component of electromobility – or to calculate and predict pedestrian flow, and thus improve the safety of public spaces. Finally, news flashes from the world of research provide a glimpse of the many other exciting developments currently under way at the University of Wuppertal.

Enjoy your reading!

PS: For the English version visit www.buw-output.de

Detektivarbeit in luftiger Höhe – Atmosphärischen Prozessen auf der Spur



von / by

Prof. Dr. Ralf Koppmann und / and Dr. Marc Krebsbach

koppmann@uni-wuppertal.de, m.krebsbach@uni-wuppertal.de

Mord in bester Gesellschaft, die Mordkommission ermittelt. Was jetzt geschieht, kennen wir aus zahlreichen TV-Krimis. Die Spurensicherung beschlagnahmt alle verwertbaren Objekte im Umfeld des Tatorts. Anschließend beginnt die kriminaltechnische Untersuchung mit ihrer Detektivarbeit. Wo Hercule Poirot noch durch geschicktes Befragen der Verdächtigen den Täter überführen musste, kommt heute Hochleistungsanalytik zum Einsatz. Fingerabdrücke und DNA-Spuren werden ausgewertet, um den Täter zu überführen. Mit modernsten massenspektrometrischen Methoden lassen sich auch mit noch so winzigen Spuren z.B. Zusammensetzung und Herkunft von Materialien oder beteiligte Personen eindeutig identifizieren. Immer häufiger wird auch die Isotopenanalyse dazu eingesetzt. Was aber hat das mit Atmosphärenforschung zu tun?

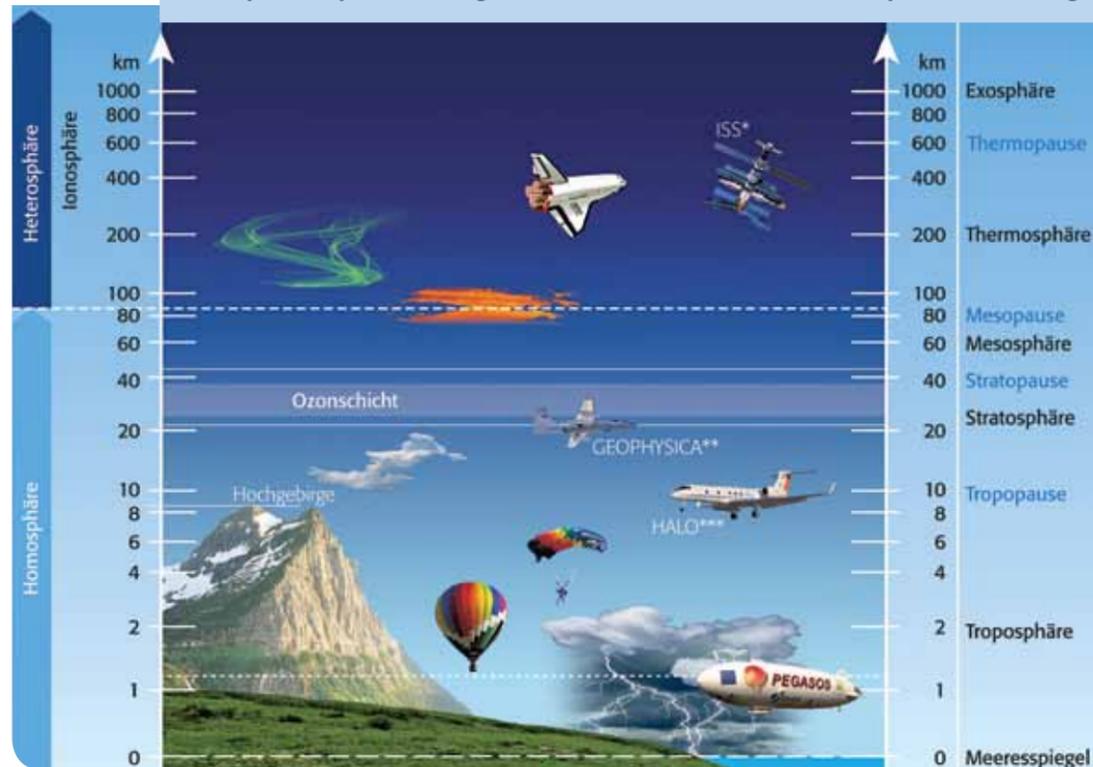


Abb. 1: Die „Stockwerke“ der Atmosphäre.

* ISS: Internationale Raumstation

** GEOPHYSICA: Russisches Höhenforschungsflugzeug

*** HALO: High Altitude and Long Range Research Aircraft,

PEGASOS: Pan-European Gas-AeroSOLS-climate interaction Study

© GDeußing, Neuss (www.pressetextkom.de), Infografik: PauraDesign, Hagen (www.paura.de), mit freundlicher Unterstützung von Prof. Dr. Ralf Koppmann, Bergische Universität Wuppertal.

Murder in high society. The serious crime squad leaps into action. What happens next is the stuff of many TV crime stories. The forensic department secures the scene of the crime and starts its search for usable evidence. Where Hercule Poirot made his arrests on the basis of clever questioning of suspects, today's detectives use high-tech analytic equipment. Fingerprints and DNA traces are scanned and evaluated. Modern mass-spectrometry can tell the composition and origin of the minutest particles of matter that might trace the

identity of a culprit. Isotope analysis is another method used with increasing frequency. But what's that got to do with atmospheric research? ☉

11 September 2012. Das deutsche Forschungsflugzeug HALO ist auf dem Weg von den Kapverden nach Kapstadt. Flughöhe 14.000 Meter. Auf diesem Flug soll untersucht werden, wie die Luft zwischen der unteren Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre, und der darüber liegenden Stratosphäre ausgetauscht wird (Abb. 1). Die Ergebnisse sollen helfen zu verstehen, wie schnell und in welchen Mengen vom Menschen in die Atmosphäre gebrachte Schadgase in diesen klimaempfindlichen Teil der Atmosphäre gelangen und möglicherweise auch die Ozonschicht angreifen. Die Wettervorhersage sagt für diesen Tag in der mittleren Troposphäre einen kräftigen Ostwind voraus. Damit werden Luftmassen vom südlichen Afrika auf den Atlantik transportiert. Gleichzeitig zeigen Satellitendaten, dass im südlichen Afrika an zahlreichen Stellen die Savannen brennen, eine für diese Jahreszeit durchaus typische Situation. Die Wissenschaftler beschließen, einen sogenannten „Dive“ durchzuführen. HALO verlässt die Flughöhe, sinkt auf 4000 Meter und „taucht“ damit für kurze Zeit in die von Afrika kommenden Luftmassen ein. Lassen sich hier „Fingerabdrücke“ und „DNA-Spuren“ von Biomasseverbrennung finden?

Ein klassischer „Fingerabdruck“ von Verbrennungsprozessen sind Stickstoffoxide. Und in der Tat, die Stickstoffoxid-Konzentration schießt um einen Faktor 10 in die Höhe, als das Flugzeug in die aus Afrika kommende Luft eintaucht. Ein erstes Indiz, dass es sich um die Abluftfahne der Savannenbrände handelt. Die mit dem in Wuppertal entwickelten Luftprobensammler MIRAH (Measurement of Stable Isotope Ratios on HALO) gesammelten Proben liefern später im Labor die „DNA-Spuren“. Der Fokus liegt dabei auf

Toluol, einem aromatischen Kohlenwasserstoff, der bei der Verbrennung von pflanzlichem Zellmaterial in hohen Mengen freigesetzt wird. Und tatsächlich, die Toluol-Konzentration steigt deutlich an und auch die Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff-13 zu Kohlenstoff-12 sprechen eine klare Sprache. Sie zeigen Werte, wie sie typischerweise in Pflanzenmaterial vorkommen und bei „frischen“ Emissionen aus brennendem Pflanzenmaterial gefunden werden. Die gesammelten Toluol-Moleküle sind erst wenige Stunden zuvor in die Atmosphäre gelangt. Zusammen mit diesen „Altersbestimmungen“ und meteorologischen Informationen (sogenannte Rückwärtstrajektorien) lassen sich die Quellregionen identifizieren. Und mit den vorhandenen Katastern des Pflanzenbestandes in Afrika sogar Menge und Art des verbrannten Materials (Abb. 2).

Solche Messungen tragen dazu bei, den bisher nur ungenügend berücksichtigten Einfluss von Biomasseverbrennung auf die globale Luftqualität und möglicherweise langfristig auf das Klima abzuschätzen. Auch in der Atmosphärenforschung sind wir also darauf angewiesen, winzigste Spuren zu nutzen, um die in der Atmosphäre ablaufenden Prozesse aufzuklären. Wie aber funktionieren „Spurensicherung“ und „kriminaltechnische“ Untersuchung in der Atmosphärenforschung?

Spurengase sind Bestandteile unserer Atmosphäre in extrem niedrigen Konzentrationen. Atmosphärenwissenschaftler nutzen sie als „Sonde“, um chemische und physikalische Vorgänge zu untersuchen. Dabei stehen „flüchtige organische Verbindungen“ (engl. Volatile Organic Compounds, VOC) im Fokus. VOC spielen eine wichtige Rolle in der Chemie unserer Atmosphäre, sind sie doch der „Brennstoff“, der die sogenannten

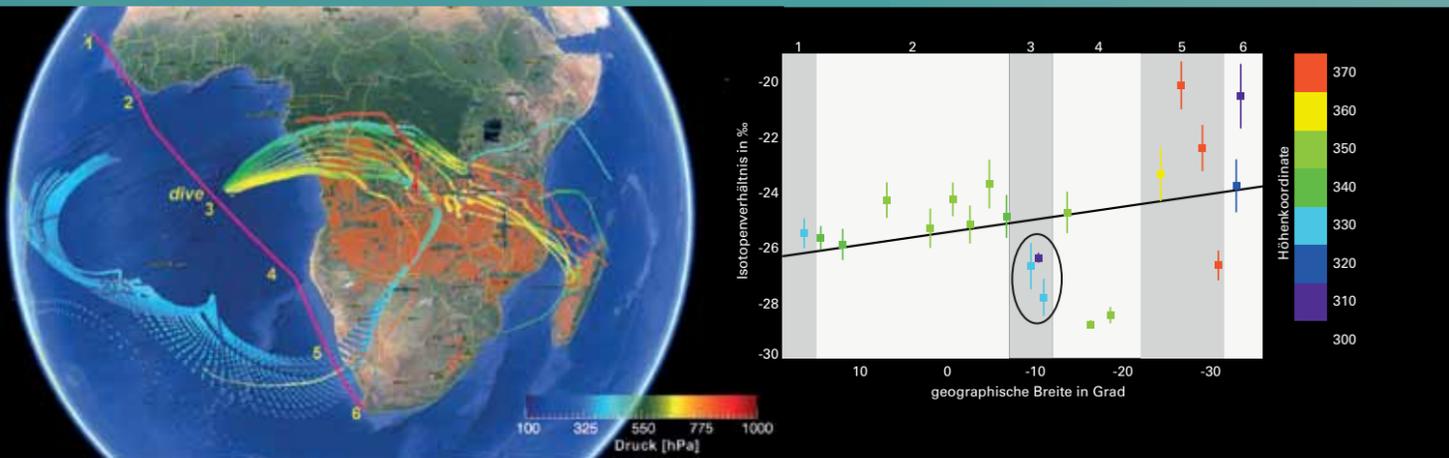


Abb. 2: Flugroute von HALO, „3“ bezeichnet die Position des „Dives“, die kleine Abbildung zeigt die gemessenen Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse von Toluol während des Fluges. Bei den farbigen Linien über Afrika handelt es sich um Rückwärtstrajektorien, die roten Punkte sind die Savannenbrände, die Höhenkoordinate ist in „potenzieller Temperatur“ angegeben.

Quelle:
US Dept of State Geographer
© 2013 Google
Data SIO, NOAA, U.S. Navy,
NGA, GEBCO
© 2013 Cnes/Spot Image
<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/>



Abb. 4: HALO kehrt von der ersten Mission nach Oberpfaffenhofen zurück. Oben auf dem Flugzeug sieht man die Spurengaseinlässe.

photochemischen Reaktionen in Gang hält. Solchen Reaktionen haben wir es zu verdanken, dass die Natur Schadstoffe abbauen und so aus der Atmosphäre wieder entfernen kann. Für unsere Forschung haben VOC gleich mehrere Vorteile. Es gibt hunderte dieser Verbindungen in der Atmosphäre aus unterschiedlichsten Quellen mit Lebensdauern von wenigen Minuten bis zu mehreren Wochen. Je nachdem welche dieser Verbindungen wir untersuchen, können wir durch eine andere „Brille“ auf die Atmosphäre schauen und sehr unterschiedliche Prozesse studieren.

Chemische und dynamische Prozesse lassen sich oft nur indirekt messen, indem man Konzentration und Verteilung von Spurengasen sowie deren zeitliche und räumliche Änderungen misst. Dabei ist es oft unmöglich, chemische Vorgänge – wie photochemische Abbaureaktionen – von dynamischen Vorgängen – wie der Änderung von Luftmassen, z.B. durch Änderung der Windrichtung – zu unterscheiden. Spurengase enthalten jedoch stabile Isotope, unterschiedliche Atome ein und desselben chemischen Elements. Isotope besitzen die gleiche Anzahl an Protonen im Kern, unterscheiden sich allerdings in der Zahl der vorhandenen Neutronen. Die Summe der Protonen und Neutronen, die Massenzahl, unterscheidet sich bei den verschiedenen Isotopen eines Elements. Bei Kohlenstoff beispielsweise kennen wir die natürlichen Isotope mit der Massenzahl 12 (^{12}C , natürlicher Prozentanteil 98,89%), Massenzahl 13 (^{13}C , natürlicher Prozentanteil 1,11%) und Massenzahl 14 (^{14}C). In diesem Fall sind die Isotope ^{12}C und ^{13}C stabil und nicht radioaktiv, während ^{14}C radioaktiv und nicht stabil ist.

Obschon ausgestattet mit vergleichbaren chemischen Eigenschaften, unterscheiden sich die Isotope

eines Elements etwa in der Geschwindigkeit, mit der sie chemisch reagieren. Verbindungen, die nur die leichteren ^{12}C -Isotope enthalten, werden schneller umgesetzt als Verbindungen, in denen ein schweres ^{13}C -Isotop vorkommt. Da man weiß, dass sich Isotopenverhältnisse auch je nach Ursprung der VOC unterscheiden, lassen sich die „Fundstücke“ unter Berücksichtigung meteorologischer Daten wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung ihren Quellen zuordnen. Das Verhältnis von schweren zu leichten Isotopen hängt also zum einen von der Quelle der Spurengase ab, zum anderen vom Verlauf chemischer Reaktionen und damit mit der „Aufenthaltszeit“ der Moleküle in der Atmosphäre. Auch bei dynamischen Prozessen, wie z.B. der Mischung von Luftmassen, ändern sich die Isotopenverhältnisse. Verhältnisse stabiler Isotope stellen somit eine Art „DNA-Spur“ für die Prozesse dar, die die Konzentration und die Verteilung eines Spurengases beeinflussen.



Abb. 3: MIRAH, eingebaut im Gepäckraum von HALO.

Die Messinstrumente zur Isotopenanalyse passen zwar inzwischen auf einen Labortisch, sind aber immer noch groß und schwer und benötigen für den Betrieb große Mengen an elektrischer Energie und flüssigem Stickstoff. Hinzu kommt, dass die Analyse einer einzigen Probe etwa drei Stunden dauert. Es ist daher z.Zt. technisch nicht möglich, ein solches Instrument auf einem Flugzeug zu betreiben. Daher müssen die Luftproben ins Labor gebracht werden. Dazu haben wir den Luftprobensammler MIRAH entwickelt. MIRAH wird im Gepäckraum des Forschungsflugzeugs HALO installiert und ist so von den übrigen Experimenten in der Flugzeugkabine unabhängig (Abb. 3). Der Sammler besteht aus einem Pumpensystem und einem Kompressor, einer Steuerelektronik und insgesamt 24 speziell präparierten Edelstahlzylindern, in die die Luft hineingedrückt wird. Die Behälter sind in zwei Modulen angeordnet, die nach jedem Flug ausgetauscht werden können.

Was sich so einfach anhört, ist im richtigen Leben sehr aufwendig und kompliziert. Die Luftprobe muss von außerhalb des Flugzeugs ins Innere zum Sammler geleitet werden, und das möglichst ohne die Luftprobe zu verändern. Dazu nutzen wir einen der an der Oberseite des Flugzeugrumpfs angebrachten Spurengaseinlässe (Abb. 4). Es handelt sich dabei in unserem Fall um ein beheiztes Edelstahlrohr, durch das die Luft gegen die Flugrichtung angesaugt wird. Das hat den Vorteil, dass Partikel und Wassertröpfchen am Einlassrohr vorbeifliegen und nicht mit gesammelt werden. Die nächste Schwierigkeit ist die hohe Ozonkonzentration in der unteren Stratosphäre. Ozon reagiert mit vielen VOC und dies würde die Zusammensetzung der Luftprobe verändern. Deshalb muss Ozon vor dem Sammelvorgang

möglichst vollständig entfernt werden, auch hier wieder ohne die restliche Zusammensetzung der Probe zu verändern. Im Sammler wird die Luft in die Probenbehälter komprimiert. So können bis zu 24 Proben pro Flugabschnitt mit jeweils bis zu 30 Litern Luft gesammelt werden. Die Probenbehälter werden dann vom Einsatzort des Flugzeugs zurück ins Labor geschickt, wo sie analysiert werden. Es kann also durchaus vorkommen, dass zwischen der Probenahme und der Analyse mehrere Wochen vergehen. Daher muss noch nachgewiesen werden, dass die organischen Verbindungen, die wir am Ende untersuchen wollen, in den Probenbehältern auch bei einer längeren Lagerzeit stabil sind.

Die Isotopenzusammensetzung der Spurengase wird mit einer Kopplung aus Gaschromatographie und Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (GC-IRMS) bestimmt (Abb. 5). Dazu müssen die organischen Verbindungen, die in Konzentrationen von einigen ppb (*parts per billion*, 1 ppb entspricht einem Molekül in einer Milliarde Luftmoleküle) bis einigen ppt (*parts per trillion*, entspricht einem Molekül in einer Billion Luftmoleküle) vorliegen, aus der Luftprobe extrahiert werden – wieder ohne die Zusammensetzung zu verändern. Für diesen Anreicherungsschritt wurde in Kooperation mit der GERSTEL GmbH & Co. KG (Mühlheim a.d.R.) ein Probenaufbereitungssystem entwickelt. In einem mehrstufigen Prozess werden die VOC aus der Luftprobe ausgefroren und angereichert. Vorher muss Wasser und Kohlendioxid entfernt werden, da sie nach dem Anreicherungsschritt in so hohen Konzentrationen vorliegen, dass sie die Messungen stören würden. Anschließend werden die organischen Verbindungen in einem Gaschromatographen in die



Abb. 5: Blick ins Isotopenlabor der Atmosphärenphysik.

einzelnen Verbindungen aufgetrennt. Jede Verbindung wird dann zu Kohlendioxid verbrannt, das anschließend in einem Massenspektrometer analysiert wird, um die Verhältnisse der Kohlenstoffisotope zu bestimmen. Dass der Weg von der Probenahme bis zur Analyse den hohen Anforderungen genügt, wurde in aufwendigen Charakterisierungsexperimenten nachgewiesen. Schließlich will man im Labor genau die Luftzusammensetzung messen, die man während des Fluges vorgefunden hat.

Der erste Einsatz von MIRAHL erfolgte im Jahr 2012 bei der TACTS/ESMVal Mission. Fünf Jahre waren vergangen von der ersten Skizze bis zu diesem Einsatz auf HALO. Fünf Jahre voller Planung, Konstruktionen, Spezialanfertigungen, Tests, Charakterisierung und Angelegenheiten verwaltungstechnischer Art. Denn um die Flugsicherheit zu gewährleisten, muss jedes Instrument auf HALO einen aufwendigen Zulassungsprozess durchlaufen und hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen. Die Funktionalität von MIRAHL im Flugbetrieb wurde bereits zwei Jahre zuvor mit Erfolg getestet. Doch jetzt bei der ersten HALO-Mission zur Atmosphärenforschung kam es darauf an! Zu wichtig war diese mit Spannung erwartete Mission, die die komplexen dynamischen und chemischen Prozesse in der für das Klima wichtigen oberen Troposphäre

und unteren Stratosphäre untersuchen sollte. Das ist zudem der Bereich, der für Messungen vom Boden und von Satelliten aus nur schwer zugänglich ist. Mit HALO haben deutsche Atmosphären- und Umweltforscher ein lang ersehntes Hilfsmittel, um genau in diese Region vorzudringen. Das fliegende Labor kann mit einer Nutzlast von mehr als drei Tonnen Höhen bis zu 15,5 Kilometer erreichen, über zehn Stunden fliegen und mehr als 8000 Kilometer zurücklegen.

Pünktlich um 11 Uhr hob HALO am 28. August 2012 ab und gab damit den Startschuss zur von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Messkampagne im Rahmen des Projekts TACTS („Transport And Composition in the Upper Troposphere and lowermost Stratosphere“). TACTS ist eine von der Universität Frankfurt koordinierte Kooperation zwischen verschiedenen deutschen Universitäten, Großforschungseinrichtungen und der Max-Planck-Gesellschaft. In den folgenden vier Wochen wurden mehrere Messflüge über Europa sowie von Oberpfaffenhofen auf die Kapverden durchgeführt. Dabei wurde der Übergang vom nordhemisphärischen Sommer zum Herbst bewusst gewählt. Frühere Messungen zeigen, dass sich während dieser Phase die chemische Zusammensetzung der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre stark ändert. Hier scheinen besonders intensive Transportprozesse zwi-



Abb. 6: Flugroute während der TACTS/ESMVal-Mission.

Quelle:
© 2013 Google
© 2009 GeoBasisDE/BKG
© 2013 Cnes/Spot Image
US Dept of State Geographer
Data SIO, NOAA, U.S. Navy,
NGA, GEBCO

schen den beiden Atmosphärenschichten abzulaufen. Werden diese Prozesse verstanden, kann auch leichter beurteilt werden, welchen Einfluss der Klimawandel hat, und wie er sich auswirken wird.

In enger Zusammenarbeit des Forschungszentrums Jülich, des Karlsruher Instituts für Technologie, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Universitäten von Frankfurt, Heidelberg, Mainz und Wuppertal wurde die Instrumentierung für ein weiteres Projekt ESMVal (Erdsystem-Modell-Validierung) unter Federführung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) genutzt, um bei Flügen zur Antarktis und rund um Afrika mit Messungen „vor Ort“ die extrem aufwendigen Erdsystem-Modelle zu überprüfen. Damit können Prognosen des künftigen Klimas weiter verbessert werden. Ziel war hier, für verschiedene Regionen charakteristische Daten zu erhalten: Stickoxidbildung durch tropische Gewitter in Zentralafrika, Emissionen großräumiger Biomasseverbrennungen im südlichen Afrika, polare Winterbedingungen der Stratosphäre der Südpolarregion, unbelastete Luft über dem indischen Ozean sowie Luftverschmutzung aus Industriegebieten in Südostasien, die durch den Monsun in die obere Atmosphäre aufsteigen und bis nach Europa transportiert werden (Abb. 6).

In mehreren Flugabschnitten konnten mit MIRAHL so über 200 Luftproben vom norwegischen Spitzbergen bis zum Rand der Antarktis genommen werden, Luftproben, die in diesem atmosphärischen Höhenbereich bislang einzigartig sind.

MIRAHL (lat. *mira*, -us: „wunderbar“, „die Wunderbare“) hat ihrer Bedeutung entsprechend wunderbar funktioniert und nicht das der Zweitbedeutung, „die

Sonderbare“, zugeschriebene typische Verhalten neu entwickelter Instrumente gezeigt.

Natürlich warten noch weitere „Kriminalfälle“ auf ihre Lösung. Die nächste Messkampagne hat ebenfalls die Untersuchung von Schadstofftransport und -abbau zum Ziel. Im Sommer 2015 wird die Selbstreinigungsfähigkeit der Atmosphäre im Rahmen der Mission OMO (*Oxidation Mechanisms Observation*) im Bereich des asiatischen Sommermonsuns erforscht. Sieben Institutionen und Universitäten werden dann mit insgesamt 15 Instrumenten über dem indischen Subkontinent messen, welche Schadstoffe vom Erdboden in die Tropopause transportiert werden, wie sie auf dem Weg dorthin bereits chemisch umgesetzt werden und welche Substanzen in welchen Mengen aus der Monsunzirkulation in die obere Troposphäre abfließen. Da die Auswirkungen auf die Luftqualität bis in die Mittelmeerregion zu beobachten sind, sind solche Untersuchungen auch für Europa von Bedeutung. MIRAHL wird wieder mit von der Partie sein ...

www.atmos.physik.uni-wuppertal.de

Literaturhinweise

Koppmann, R. (ed.), Volatile Organic Compounds in the Atmosphere, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, 2007.
Wintel, J., Hösen, E., Koppmann, R., Krebsbach, M., Hofzumahaus, A., and Rohrer, F., Stable carbon isotope ratios of toluene in the boundary layer and the lower free troposphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11059-11071, doi:10.5194/acp-13-11059-2013, 2013.
Fisseha, R., H. Spahn, R. Wegener, T. Hohaus, H. Brasse, G. and Wissel, R. Tillmann, A. Wahner, R. Koppmann, and A. Kiendler-Scharr, Stable isotope composition of secondary organic aerosol from β -pinene oxidation, *J. Geophys. Res.* 114 (D02304), doi:10.1029/2008JD0111326, 2009.
Iannone, R., R. Koppmann, and J. Rudolph, A Technique for Atmospheric Measurements of Stable Carbon Isotope Ratios of Isoprene, Methacrolein, and Methyl Vinyl Ketone, *J. Atmos. Chem.* 58, 181-202, doi: 10.1007/s10874-007-9087-5, 2007.

Dynamik von Fußgängerströmen



Foto: Ralf Uwe Limbach



von / by

Prof. Dr. Armin Seyfried und / and Dipl.-Ing. Stefan Holl

seyfried@uni-wuppertal.de, st.holl@uni-wuppertal.de

Bereits in der Antike haben Architekten und Baumeister die Anlagen für Fußgänger sorgfältig geplant. Insbesondere das Kolosseum in Rom, das schon vor 2000 Jahren etwa 50.000 Besucher fasste, zeichnet sich durch eine hervorragende Gestaltung der Verkehrswege aus. Noch heute gelten die Mundlöcher und Tribünen des Kolosseums als Vorlage für die Gestaltung moderner Stadien. Aber auch aus naturwissenschaftlicher Sicht sind Fußgängerströme interessant. Für Physiker und Mathematiker handelt es sich um ein komplexes System selbstgetriebener Teilchen, welches spannende Phänomene der Selbstorganisation und interessante Nichtgleichgewichtseffekte aufweist. Im vorliegenden Artikel wird beschrieben, wie die Forschungsergebnisse im Bereich der Fußgängerdynamik zu einer Verbesserung der Werkzeuge für die Planung von Fußverkehrsanlagen beitragen können. Hierzu wurden Feldstudien, aber auch Experimente mit vielen hundert Probanden durchgeführt, in denen die Laufwege jeder einzelnen Person aus Videodaten extrahiert wurden. Auf Grundlage der experimentellen Daten können Kenngrößen für die sichere Gestaltung der Verkehrsanlagen abgeleitet, aber auch Simulationsmodelle kalibriert und validiert werden.



The architects and master-builders of antiquity already used their knowledge of pedestrian flows to plan stadiums like Rome's Colosseum, built 2000 years ago to hold an audience of some 50,000. Excellently planned, the entrances, exits and tribunes of this theater are still used today as models for modern stadiums. But pedestrian flows are also scientifically interesting in their own right. For mathematicians and physicists they represent complex particle systems exhibiting fascinating phenomena of self-organization and disequilibrium.

The article will explain how research results from pedestrian flow dynamics can contribute to the improvement of tools for planning pedestrian zones and buildings. This involves field studies, as well as experiments with hundreds of volunteers whose movements are plotted from video data. Parameters derived from experimental data of this sort can contribute to the design of safe walkways, as well as to the calibration and validation of simulation models.

Mit dem Wachstum der Städte und einem gesteigerten Verkehrsaufkommen sind die Herausforderungen für den Stadt- und Verkehrsplaner heute größer denn je. Stauungen gehören zum Alltag, kritische Situationen und Unfälle passieren. Besonders deutlich werden die Probleme in Stadtzentren. Dort sammeln sich regelmäßig große Menschenmengen aus unterschiedlichen Anlässen (Großveranstaltungen, Demonstrationen, Weihnachtsmärkte etc.). Die bestehende Verkehrsinfrastruktur und der zur Verfügung stehende Raum geraten dabei häufig an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Dies gilt vor allem für europäische Großstädte, die aus historischen Gründen durch begrenzte Raumressourcen und oft auch durch besondere geographische Gegebenheiten geprägt sind. Bei der Planung der Verkehrsanlagen für Fußgänger werden

Bemessungshandbücher und seit einigen Jahren auch Computersimulationen eingesetzt, welche helfen sollen, beispielsweise folgende Fragen zu beantworten: Wie lange dauert es, ein Sportstadion zu räumen? Wie viele Menschen verträgt der Kölner Hauptbahnhof? Wann entsteht ein Fußgängerstau?

Die Komplexität dieser Aufgaben wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass im Gegensatz zum Autoverkehr der Fußverkehr kaum durch Verkehrsregelungen wie Spuren, Ampeln oder Verkehrsschilder geordnet wird. Zudem sind die Anlagentypen für den Fußverkehr vielfältiger als für den Autoverkehr. Neben Ecken, Kehren, Kreuzungen, Engstellen und Türen auf ebenen Wegen gibt es Treppen und Rampen in unterschiedlichen Formen. Darüber hinaus gilt es, eine Vielzahl von Einflüssen, welche körperlicher, soziologischer oder psychologischer Natur sein können, zu berücksichtigen.

Ein Blick in die Vorschriften, Handbücher und wissenschaftlichen Journale zeigt, dass selbst Antworten auf scheinbar triviale Fragen widersprüchlich ausfallen können. Beispielsweise reicht die Spanne für Vorgaben von Rettungswegebreiten in Versammlungsstätten, wie Arenen oder Diskotheken, europaweit von 50 bis 120 Zentimeter je 100 Personen [1]. Als weiteres Beispiel sei das Fundamentaldiagramm, die wichtigste Charakteristik zur Bemessung von Verkehrsanlagen, genannt. Diese Beziehung gibt an, wie sich in einem Personenstrom die Geschwindigkeit oder der Durchsatz mit der Personendichte ändern. Anhand des Fundamentaldiagramms eines Systems lässt sich ablesen, wann es zu einem Stau kommt oder welcher maximale Durchsatz möglich ist. Ein Blick in unterschiedliche Handbücher offenbart aber dramatische Differenzen in den Angaben zum



Abb. 1a: Für die Untersuchung kultureller Unterschiede in der Dynamik von Personenströmen wurden Experimente mit deutschen und indischen Studenten verglichen. Es stellte sich heraus, dass indische Studierende bei hohen Dichten schneller laufen als deutsche Studierende.



Abb. 1b: Ergebnisse von Experimenten an Engstellen konnten helfen, die rechtlichen Vorgaben von Rettungswegebreiten für Versammlungsstätten zu verbessern.

Abb. 1c: In dem Forschungsprojekt „Hermes“ wurde ein Evakuierungsassistent für Sportstadien entwickelt, der u. a. prognostizierte, wo es zu Stauungen kommen wird. Zur Kalibrierung der Prognosemodelle wurden u. a. Experimente in der Düsseldorfer Esprit-Arena durchgeführt. Foto: Jan Ovelgönne



Fundamentaldiagramm. Während in einem amerikanischen Handbuch des Brandschutzes [2] die Staudichte mit 3,8 Personen pro Quadratmeter angegeben wird, findet sich in dem russischen Pendant [3] eine Staudichte von 10 Personen pro Quadratmeter. Diese Unsicherheiten spiegeln sich in sämtlichen Werkzeugen der Ingenieure wider, seien es gesetzliche oder normative Vorgaben, Bemessungshandbücher oder Computersimulationen von Fußgängerströmen. In der Fachliteratur findet sich eine Vielzahl von Thesen, welche die Abweichungen in den empirischen Daten begründen. Allerdings fehlen in der Regel experimentelle Untersuchungen als Basis belastbarer Kennwerte.

Um diesen Mangel zu beheben und systematisch eine empirische Datenbasis zur Dynamik von Fußgängerströmen aufzubauen, arbeitet der Lehrstuhl „Computersimulationen für Brandschutz und Fußgängerverkehr“ der Bergischen Universität Wuppertal in enger Kooperation mit der Abteilung „Civil Security and Traffic“ im Jülich Supercomputing Centre des Forschungszentrums Jülich und Prof. Dr. Andreas Schadschneider von der Universität zu Köln zusammen. 2005 wurden – damals noch in Kooperation mit Prof. em. Dr.-Ing. Wolfram Klingsch von der Bergischen Universität Wuppertal – die ersten Experimente unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Im Laufe der folgenden zehn Jahre konnten dann die organisatorischen, technischen und methodischen Ansätze so ausgebaut werden, dass zuletzt Experimente über mehrere Tage mit bis zu 1000 Probanden realisiert wurden.

Zu Beginn wurden einfach strukturierte Experimente mit 30 bis 60 Probanden durchgeführt. Ziel war eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen. So konnte untersucht werden, wie sich die Methodik der Auswertung auf die Ergebnisse auswirkt und ob die Abweichungen in den Literaturdaten durch unterschiedliche Messverfahren verursacht sein könnten. Es stellte sich heraus, dass einige – aber nicht alle – Widersprüche aufgelöst werden konnten. Den Einfluss des kulturellen Hintergrundes der Probanden konnte in einem Kooperationsprojekt mit dem *Indian Institute of Technology* (IIT) Kanpur, Indien, analysiert werden. Es zeigte sich, dass bei niedrigen Dichten indische Studenten genauso schnell laufen wie deutsche, aber bei hohen Dichten und Gedränge signifikant schneller sind (Abb. 1a). Auch Frage-



Abb. 1d: Wann aus einem normalen Stau ein gefährliches Gedränge werden kann, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „BaSiGo“ untersucht. Das Bild zeigt ein Experiment an Kreuzungen. Foto: Ralf Eisenbach

stellungen zum Fluss durch Engstellen wurden untersucht (Abb. 1b). In diesen Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Linien, die sich am Rand der Engstellenwand bilden, nicht zu einer stufenweisen Steigerung der Kapazität von Engstellen führen [4]. Diese Feststellung führte in der aktuellen Muster-Versammlungsstättenverordnung zu einer Änderung der Regelungen für die Rettungswegebreiten, so dass die Ergebnisse der Forschung in naher Zukunft auch in das Baurecht der Länder einfließen werden.

In ihrem Aufbau komplexer wurden die Experimente durch BMBF-Forschungsprojekte wie „Hermes“ und „BaSiGo“. Ziel des Projektes „Hermes“ war es, einen Evakuierungsassistenten für Sportstadien zu entwickeln. Der in der Düsseldorfer Esprit-Arena getestete Assistent versorgte Entscheidungsträger der Polizei, des Sicherheitsdienstes und der Feuerwehr mit Informationen zur Befüllung bzw. Überfüllung des Gebäudes. Für Notfälle, die eine Räumung des Stadions notwendig machen, wurde mit Hilfe mathematisch-physikalischer Modelle eine Prognose erstellt, an welchen Stellen es im Gebäude zu Stauungen kommen wird und gleichzeitig Empfehlungen für die bestmögliche Evakuierung gegeben. Für die Kalibrierung und Validierung der Modelle wurden mit bis zu 400 Probanden Experimente in Tribünen, Ecken, T-Kreuzungen sowie Korridoren mit uni- und bidirektionalen Strömen durchgeführt (Abb.1c) [5]. Ein besonderes Ergebnis dieser Experimente war der

Nachweis, dass in bidirektionalen Personenströmen der maximale Durchsatz signifikant kleiner ist als bei unidirektionalen Strömen [6].

Das aktuelle Projekt „BaSiGo – Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ beschäftigt sich mit der Thematik „Großveranstaltungen“. Aufgabe in diesem Projekt ist es, die Entstehung von Gedränge und kritischen Zuständen zu untersuchen, wie sie bei der Loveparade 2010 in Duisburg im Bereich der Rampe aufgetreten sind. In der Messe Düsseldorf wurden dazu im vergangenen Jahr Experimente mit insgesamt etwa 2000 Probanden durchgeführt. An fünf Tage wurden unter anderem Stauungen an Kreuzungen und Gedränge vor Bühnenbereichen untersucht (Abb. 1d).

Für die Auswertung der Experimente kommen Verfahren der Computervision zum Einsatz, mit denen es möglich ist, aus Videoaufnahmen von Personenströmen automatisch die Laufwege jedes Fußgängers zu bestimmen. Am Forschungszentrum Jülich wurden hierfür eigens angepasste Verfahren entwickelt: Tragen die Probanden Marker, wie beispielsweise Punkte auf Mützen, können die Laufwege zuverlässig und auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden (Abb. 2a). Für dreidimensionale Anlagen wie Tribünen werden Höheninformationen aus Stereokameras genutzt (Abb. 2b). Für dieses Tracking mit Markern wurde die Open-Source-Software *PeTrack* entwickelt. Dieses Softwarepaket steht allen Wissenschaftlern zur freien

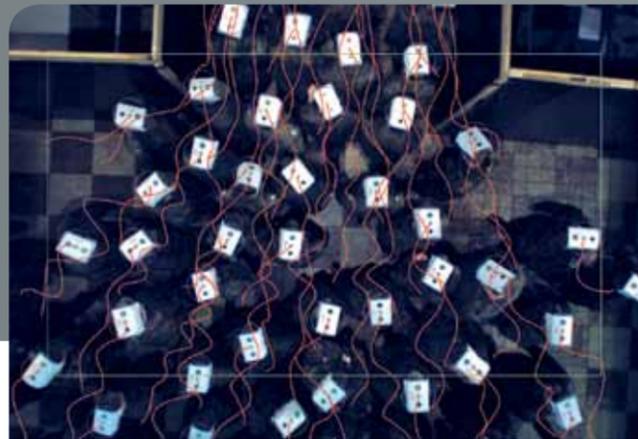


Abb. 2a: Die Probanden tragen Marker auf den Köpfen, so dass die Laufwege der Fußgänger (rote Linien) automatisch und auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden können.

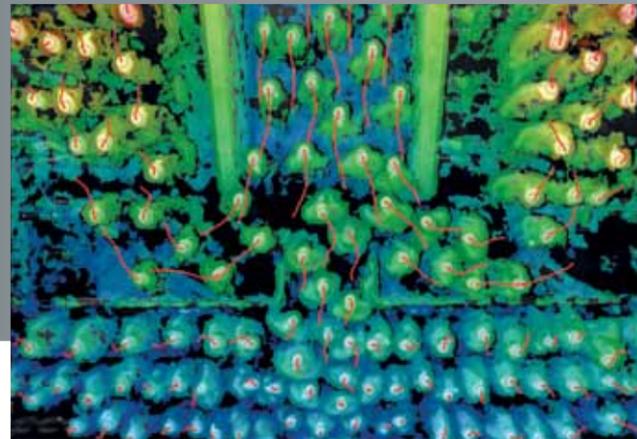


Abb. 2b: Um die Laufwege in drei-dimensionalen Anlagen wie Tribünen (siehe Abb. 1c) ermitteln zu können, werden Stereokameras eingesetzt. Hiermit lässt sich ein Höhenfeld berechnen, das auch die Kontur der Fußgänger wiedergibt.

Verfügung und wird mittlerweile weltweit von unterschiedlichen Forschungsgruppen verwendet (www.fz-juelich.de/jsc/petrack).

Aber auch Verfahren, die ohne Marker arbeiten und in Zukunft für Feldversuche zum Einsatz kommen, sind in der Entwicklung [7]. Im Projekt „BaSiGo“ wurde in den Experimenten zudem der Schritt vollzogen, nicht nur die Laufwege jedes Fußgängers zu bestimmen, sondern auch zu identifizieren, welchem Probanden dieser Laufweg zuzuordnen ist. Sobald die Entwicklung und Adaption der zu Grunde liegenden Algorithmen abgeschlossen ist, wird es möglich sein, zu untersuchen, inwieweit Eigenschaften wie Geschlecht, Alter, Größe und Fitness einzelner Probanden sich in kollektiven Eigenschaften von Personenströmen auswirken. Die Videoaufnahmen der Versuche und auch die Trajektorien stehen auf den Webseiten www.asim.uni-wuppertal.de/datenbank.html und <http://ped.fz-juelich.de/database> zur Verfügung.

Bei der Auswertung der Laufwege der Fußgänger helfen Konzepte aus dem Ingenieurwesen, der Physik und Mathematik. Ein spezielles Problem stellt dabei die Messung der Dichte dar. Im Allgemeinen soll diese möglichst lokal bestimmt werden. Allerdings sind die „Teilchen“ – hier die Fußgänger – von der gleichen Größenordnung wie der Messbereich, in dem die Dichte bestimmt werden soll. Dies führt zu großen Fluktuationen. Zur Lösung dieses Problems werden Voronoi-Diagramme genutzt, die jeder Person alle die Punkte im Raum zuordnen, die näher an ihr selbst als an einer anderen Person liegen. Diese Messmethode ermöglicht es, Iso-Karten

von Dichte, Geschwindigkeit und Flüssen zu erstellen (Abb. 3). So kann identifiziert werden, an welchen Stellen potentiell gefährlich hohe Dichten auftreten oder wo exakt die Prozesse stattfinden, die zu Beschränkungen des Durchsatzes führen. Abbildung 3a zeigt die Iso-Karte für den Durchsatz vor einer Engstelle. Es zeigt sich, dass sich der Durchsatz nicht in der Engstelle selbst ändert (Übergang von Grün zu Rot), sondern etwa einen Meter vor der Engstelle. Dies rechtfertigt die Annahme, dass die notwendige Koordination beim „Einsortieren“ der Fußgänger in die Engstelle die Verminderung des Durchsatzes bestimmt.

Die empirischen Ergebnisse werden nicht nur für die Verbesserung von gesetzlichen Regelungen und Handbüchern, sondern auch zur Entwicklung von Modellen, welche die Bewegung einzelner Fußgänger abbilden, herangezogen. So ist es möglich, den Einfluss jeder einzelnen Person auf die Dynamik eines Personenstromes zu berücksichtigen. In dem am Forschungszentrum Jülich entwickelten *Generalized Centrifugal Force Model* (GCFM) wird der sich fortbewegende menschliche Körper durch Ellipsen abgebildet, welche ihre Achsen mit der Geschwindigkeit ändern [8]. Um den Ellipsen ein wenig „Geist einzuhauchen“ erhalten sie zudem die Möglichkeit, Stausituationen zu erkennen, in der wahrnehmbaren Umgebung nach alternativen Routen zu suchen und diese zu bewerten [7]. Abbildung 4 zeigt diesen Prozess für einen Raum mit zwei Ausgängen. Zunächst gehen alle Fußgänger zu dem Ausgang, der ihnen am nächsten gelegen ist (Abb. 4a). Es bilden sich

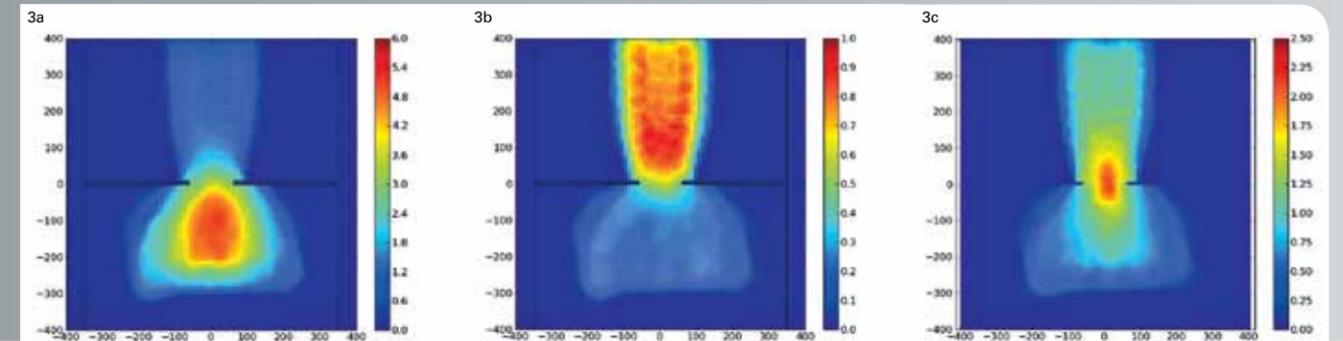


Abb. 3: Die Nutzung von Voronoi-Diagrammen zur Messung der Dichte und Geschwindigkeit ermöglicht die Erstellung von Dichtekarten. Die Fußgänger bewegen sich durch eine Engstelle von unten nach oben. Deutlich ist der keilförmige Staubereich vor der Engstelle zu erkennen (3a). Prozesse, die den Durchsatz beschränken, werden durch Änderung des Flusses angezeigt. Dies findet nicht in, sondern einen Meter vor der Engstelle statt (3c).

Grafik: Jack Liddle

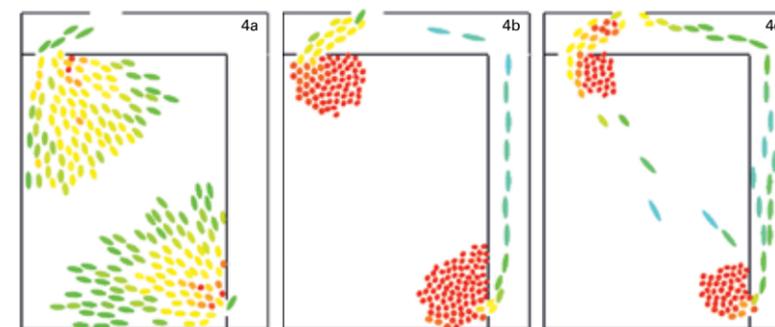
vor der Tür Stauungen (Abb. 4b). Nach einer gewissen Zeit entscheiden sich Fußgänger um und bewegen sich zu dem Ausgang, der eine kürzere Wartezeit verspricht (Abb. 4c). In einer weiteren Arbeit wurden die Ellipsen in der Simulation in die Lage versetzt, ein digitales Gebäude ohne Vorwissen erstmalig zu betreten, das Wegesystem aus Fluren, Türen und Räumen wahrzunehmen, selbständig zu erkunden, ihr Wissen über das Wegenetzwerk zu speichern und zu bewerten.

Ziel jeder Erweiterung der Modelle ist es, diese noch dichter an die Realität heranzuführen. Für diese Modellerweiterung werden aber Daten für die Validierung und Kalibrierung benötigt. In dem aktuell von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „Quantitative Beschreibung der Staubildung in Fußgängerströmen“ arbeitet der Lehrstuhl „Computersimulationen für Brandschutz und Fußgängerverkehr“ der Bergischen Universität Wuppertal mit der Universität zu Köln und den Wuppertaler Gymnasien Bayreuther Straße und Wilhelm Dörpfeld zusammen. In diesem Projekt wird untersucht, wie die

Bildung von Gruppen in Personenströmen die Räumung beeinflusst und welche Auswirkungen die Heterogenität einer Probandengruppe auf die Entstehung von Stauungen hat. Die Experimente sind so aufgebaut, dass die Schüler diese eigenständig auswerten und eigene Forschungsfragen entwickeln können. Hierdurch sollen die Schüler dafür sensibilisiert werden, welche Gefahren in großen Menschenmengen herrschen und welchen eigenen Beitrag jeder Einzelne leisten kann, das nächste Public Viewing oder Musikfestival sicher zu genießen.

www.asim.uni-wuppertal.de
www.fz-juelich.de/ias/jsc/cst

Abb. 4: In der Computersimulation werden Fußgänger als Ellipsen dargestellt, die ihre Form mit der Geschwindigkeit ändern. Bei der Räumung des Raumes gehen alle Fußgänger zunächst zu dem Ausgang der ihnen am nächsten gelegen ist (4a). Vor der Tür bilden sich Stauungen (4b). Nach einer gewissen Zeit entscheiden sich Fußgänger um und bewegen sich zu dem Ausgang, der eine kürzere Wartezeit verspricht (4c). Animationen: Ulrich Kemloh



Literaturhinweise

- [1] Forell, B.; Seidenspinner, R. und Hosser D., Quantitative comparison of international design standards of escape routes in assembly buildings. In: Klingsch, W. W. F.; Rogsch, C.; Schadschneider, A. & Schreckenberg, M. (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 791–801
- [2] Nelson, H. E. and Mowrer, F. W., Emergency movement. In: DiNenno, P. J. (Ed.) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, National Fire Protection Association, 2002, 367–380
- [3] Predtechenskii, W. M. & Milinskii, A. I., *Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1971 (Original in Russisch, Stroiizdat Publishers, Moscow, 1969)
- [4] Seyfried, A.; Passon, O.; Steffen, B.; Boltes, M.; Rupprecht, T. and Klingsch, W., New insights into pedestrian flow through bottlenecks. In: *Transportation Science*, 2009, 43, 395–406
- [5] Burghardt, S., *Dynamik von Personenströmen in Sportstadien*. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe IAS, Band 18, Dissertation Bergische Universität Wuppertal, 2013
- [6] Zhang, J., *Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries*. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe IAS, Band 14, Dissertation Bergische Universität Wuppertal, 2012
- [7] Boltes, M. und Seyfried, A., *Collecting pedestrian trajectories*. In: *Neurocomputing*, 2013, 100, 127–133
- [8] Chraïbi, M., *Validated force-based modeling of pedestrian dynamics*. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe IAS, Band 13, Dissertation Universität zu Köln, 2012
- [9] Kemloh, U., *Route Choice Modelling and Runtime Optimisation for Simulation of Building Evacuation*. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Reihe IAS, Band 17, Dissertation Bergische Universität Wuppertal, 2013

Hadronenphysik mit Gittereichtheorie



von / by

Prof. Dr. Andreas Frommer

frommer@math.uni-wuppertal.de

Der Sonderforschungsbereich Transregio „Hadronenphysik mit Gittereichtheorie“ ist eines der größeren, langfristig geförderten Forschungsvorhaben an der Bergischen Universität Wuppertal. Als gemeinsames Projekt mit den Universitäten Regensburg und Graz hat der Sonderforschungsbereich das Ziel, in einer fächerübergreifenden Kooperation die Quantenchromodynamik als fundamentale Theorie der Quarks als Bausteine der Materie so auszuwerten, dass wir den Zustand des frühen Universums ebenso zu verstehen lernen wie die Messergebnisse an Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider des CERN. Der vorliegende Beitrag will zum einen das Format Sonderforschungsbereich allgemein als Form der Förderung in der Grundlagenforschung vorstellen, zum anderen sollen einige Besonderheiten des Transregio „Hadronenphysik mit Gittereichtheorie“ beschrieben werden – mit einem Schwerpunkt auf der inhärenten Interdisziplinarität und damit der Rolle der Mathematik in einem grundsätzlich auf physikalische Erkenntnis ausgelegten Forschungsprogramm.

The Transregio Collaborative Research Center on “Hadron Physics with Lattice Gauge Theory” is one of the University of Wuppertal’s major long-term research projects funded by the German Research Foundation. A joint undertaking with the Universities of Regensburg and Graz, the Research Center seeks to evaluate quantum chromodynamics – the fundamental theory of quarks as building-blocks of matter. The aim is to understand on the one hand the state of the primordial universe, and on the other the results measured by par-

ticle accelerators like CERN’s Large Hadron Collider. After outlining the Collaborative Research Center as a funding mode for basic research in general, the article will describe some special features of the Transregio project on “Hadron Physics with Lattice Gauge Theory”, concentrating on its inherently interdisciplinary nature, and especially on the role of mathematics in a program concerned essentially with the knowledge proper to physics. ©

Ausländische Kollegen drücken im Gespräch immer wieder ihre Bewunderung für das System der Forschungsförderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) aus. Drei Punkte sind es gewöhnlich, die den Kollegen besonders imponieren: Erstens ist es Zweck der DFG, die Grundlagenforschung zu fördern. Antragsteller sind also nicht gezwungen, Anwendungsszenarien zu erdenken, wenn solche denn auch nicht primär die Motivation für die Forschungsarbeiten darstellen. Zweitens organisiert sich die DFG aus der Gemeinde der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in einem demokratischen Prozess. Damit verbindet sich eine unbedingte Orientierung an den Anforderungen der Wissenschaft und eine gewisse Unabhängigkeit von der aktuellen politischen Wetterlage. So ist es sicher kein Zufall, dass der administrative Aufwand in einem DFG-Projekt gefühlt und wohl auch tatsächlich eher im einstelligen Prozentbereich im Vergleich zu einem Projekt mit EU-Förderung liegt. Drittens, und dies ist vielleicht für die Kollegen das Beeindruckendste, gibt es bei der DFG wirklich langfristige Förderformate. Zu diesen gehören die Sonderforschungsbereiche (SFBs), über die hier kurz im Allgemeinen und dann mit dem SFB „Hadronenphysik mit Gittereichtheorie“ ausführlicher im Besonderen berichtet werden soll.

SFBs sind langfristig angelegte Forschungseinrichtungen der Hochschulen, in denen Wissenschaftler im Rahmen eines fächerübergreifenden Forschungsprogramms zusammenarbeiten. Strukturziel ist die Schwerpunktbildung in Hochschulen. SFBs werden für eine Dauer von maximal zwölf Jahren eingerichtet, nach jeweils vier Jahren wird auf Grund einer Zwischenevaluation über eine Verlängerung ent-

den. Vor der Einrichtung und vor jeder Verlängerung wird ein Begutachtungsprozess durchlaufen, in welchem ein Gremium aus rund zehn nationalen und internationalen Gutachtern aufgrund eines schriftlichen Antrags und einer Begehung vor Ort über die Förderwürdigkeit entscheidet. Ausschlaggebend für eine Förderung sind die Qualität des Forschungsprogramms, das sich konsistent aus den typischerweise 15 bis 20 Teilprojekten ergeben muss. Kooperation über Fächergrenzen hinweg wird vorausgesetzt.

An der Bergischen Universität besteht seit 2008 der SFB-TRR55 „Hadronenphysik mit Gittereichtheorie.“ Das Kürzel „TRR“ steht dabei für „Transregio“ und weist darauf hin, dass dieser SFB mehrere Standorte hat, im vorliegenden Fall noch die Universität Regensburg sowie die Karl-Franzens-Universität Graz. Das Transregio-Konzept gestattet es kleineren Standorten, sich so zusammenschließen, dass die für einen SFB notwendige kritische Masse überhaupt erreicht wird. Standorte aus Österreich und der Schweiz können aufgrund eines Abkommens der nationalen Förderorganisationen mit einbezogen werden.

Der Kern des physikalischen Forschungsprogramms des SFB-TRR55 basiert auf der Quantenchromodynamik (QCD), das heißt der Theorie der Quarks und Gluonen und ihrer Wechselwirkung. Sie ist der komplizierteste, aber auch phänomenologisch reichste Teil des Standardmodells der Teilchenphysik. Die offenen Probleme der QCD umfassen zum Beispiel so grundlegende Fragen wie: Welche neuartigen hadronischen Zustände gibt es zusätzlich zu den bekannten Drei-Quark- und Quark-Antiquark-Zuständen und welche Eigenschaften haben sie? Wie sieht das QCD-Phasen-Diagramm

als Funktion der Dichte und Temperatur aus? Wie viel Bahndrehimpuls tragen die Quarks im Nukleon? Wie sieht der Niederenergie-Grenzwert der QCD aus? Die Mitglieder des SFB-TRR55 arbeiten an diesen und vielen anderen Fragen. Der SFB hat drei große Ziele:

1: Es sollen mithilfe der Gitter-Quantenchromodynamik (Gitter-QCD) Größen berechnet werden, die helfen, aus den einschlägigen Experimenten an den weltweiten Großforschungszentren auf den inneren Aufbau der Hadronen und die detaillierte Dynamik ihrer Reaktionen zu schließen. In diesem Bereich ergänzen sich die Gruppen in der Theoretischen Teilchenphysik in Regensburg (Prof. Dr. Gunnar Bali, Prof. Dr. Vladimir Braun, Prof. Dr. Dirk Pleiter, Prof. Dr. Andreas Schäfer, Dr. Sara Collins, Dr. Meinulf Göckeler, Dr. Enno Scholz), Wuppertal (Prof. Dr. Zoltan Fodor, Prof. Dr. Thomas Lippert, Dr. Stephan Dürr, Dr. Christian Hölbling) und Graz (Prof. Dr. Christof Gattringer, Prof. Dr. Christian Lang).

2: In enger Zusammenarbeit von Physikern und Mathematikern sollen wesentliche algorithmische Fortschritte erzielt werden, die insbesondere effiziente numerische Gitter-QCD-Simulationen mit guter chiraler Symmetrie ermöglichen. Diese Symmetrie spielt eine zentrale Rolle in der Hadronenphysik. Für diesen Bereich kommen aus Wuppertal Prof. Dr. Michael Günther (siehe S. 30–35) und der Autor dieses Artikels aus der Mathematik sowie Prof. Dr. Francesco Knechtli aus der Physik hinzu. Zudem ist hier (und in 3) die Zusammenarbeit mit dem Supercomputing Centre des Forschungszentrums Jülich wichtig, dessen Leiter Prof. Lippert gleichzeitig Professor an der Bergischen Universität ist.

3: Es sollen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie und anderen Forschungszentren und Universitäten neue Spezialrechner für die Gitter-QCD entwickelt werden, die ein besonders günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis und einen besonders niedrigen Stromverbrauch haben. Für diese Hardware-Komponente innerhalb des SFBs-TRR55 zeichnet Prof. Dr. Tilo Wettig aus Regensburg verantwortlich.

Unser SFB befindet sich gerade in der Mitte seines – die erfolgreiche Antragstellung für eine zweite Verlängerung vorausgesetzt – zwölfjährigen Lebenszyklus. Nach einer überzeugenden Zwischenbegutachtung wurde 2012 der Fortsetzungsantrag für die zweite Förderperiode 2013 bis 2016 von der DFG bewilligt. Der kollegialen Absprache entsprechend wechselte für diese zweite Förderperiode die Sprecherrolle von Prof. Schäfer aus der Physik in Regensburg hin zum Autor des vorliegenden Beitrags aus der Mathematik in Wuppertal. Das bedeutet auch, dass die Verwaltung der mehr als 1,2 Mio. Euro Förderung pro Jahr für insgesamt rund 20 Doktoranden und Postdocs sowie Reisen und Gäste in diesem Zeitraum der Bergischen Universität obliegt.

Der SFB ist mit seiner Arbeit in der internationalen Wissenschaftsgemeinde sehr präsent. Der Beitrag von Prof. Fodor und Dr. Krieg in diesem Heft (siehe S. 24–28) verweist auf mehrere Artikel in hochrangigen Zeitschriften wie Science und Nature. Auf der diesjährigen internationalen Jahrestagung zur Gittereichtheorie LATTICE 2014 an der Columbia University in New York wurden gleich drei eingeladene Hauptvorträge von Mitgliedern des SFBs gehalten, zudem wurde Gergely Endrödi – ein Regensburger Postdoc im SFB – für seine Beiträge zum Verständnis der (QCD-)Materie

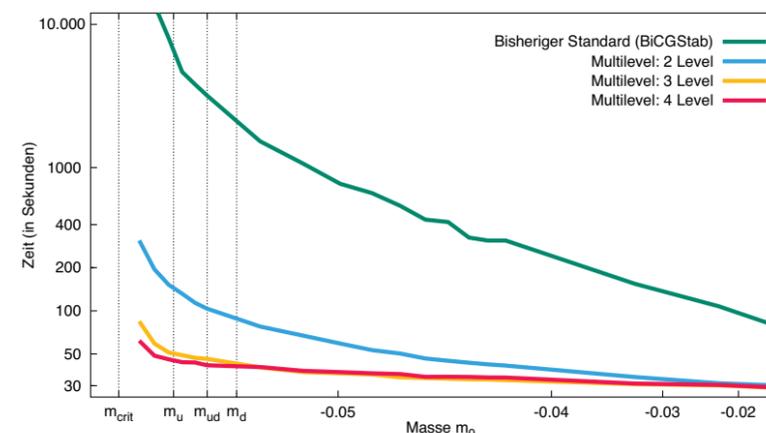


Abb. 1: In der Abbildung sind die Rechenzeitgewinne in Abhängigkeit von der simulierten Quark-Masse dargestellt; weiter links befinden sich die realistischen Werte.

in starken magnetischen Feldern und zur QCD-Thermodynamik mit dem Wilson-Award für Nachwuchswissenschaftler ausgezeichnet. Die Arbeit zu Matrix-Funktionen des Doktoranden Marcel Schweitzer aus Wuppertal wurde auf dem diesjährigen Householder-Symposium in Spa (Belgien) prämiert. A propos: Nachwuchsförderung ist eine wichtige Komponente eines jeden SFBs. Dem Nachwuchs stehen über den SFB Mittel für Reisen aber auch zur Einladung von Gästen zur Verfügung. Unsere regelmäßigen SFB-internen Workshops wie auch spezielle „Training-Events“ – der nächste findet im Dezember 2014 im Leibniz-Zentrum für Informatik Schloss Dagstuhl statt – tragen mit zu einer besonderen Qualifizierung der Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler bei.

Wie situieren sich nun die Beiträge der Mathematik in einem Forschungsprogramm, in welchem die Vertiefung der physikalischen Erkenntnis im Vordergrund steht? Dazu muss man vorausschicken, dass mit der

QCD die physikalische Theorie der Quarks als Bausteine der Materie zwar grundsätzlich bekannt ist, diese Theorie aber dermaßen komplex ist, dass man aus ihr meist nur dann für unsere Welt signifikante Ergebnisse ableiten kann, wenn man sie durch Diskretisierung einer Computersimulation zugänglich macht. Diskretisierung bedeutet, dass man die Gleichungen der QCD, die sich auf das Raum-Zeit-Kontinuum beziehen, dadurch approximiert, dass sie sich nur noch auf eine endliche (wenn auch sehr große) Zahl von Raum-Zeit-Punkten, das Gitter, beziehen.

Nachdem so erreicht wurde, dass wir mit einer endlichen Zahl von Werten auskommen können, kann eine Computersimulation, die ja selbst auch nur eine endliche Zahl (wenn auch eventuell sehr große) von Werten berechnen kann, durchgeführt werden. Die Approximation durch Diskretisierung wird umso genauer, je mehr Punkte das Gitter enthält. Dann steigen aber auch die Kosten für die Simulation, weshalb Gitter-QCD-Simulationen typische Supercomputer-Anwendungen darstellen. In diesen Simulationen werden mit stochastischen und numerischen Verfahren physikalisch wichtige Größen, Diagramme oder ganze Prozesse berechnet. Die Mathematik trägt nun dazu bei, diese Verfahren zu verbessern, indem sie schneller und/oder genauer gemacht werden und besser auf das Mehrprozessor-Prinzip der Supercomputer abbildbar sind.

Eine Kernaufgabe in den Simulationen der Gitter-QCD ist die Lösung von Gleichungssystemen mit dem Dirac-Wilson-Operator. In den letzten Jahren ist es uns gelungen, hier eine Methode einzuführen, die diese Systeme dadurch besonders effizient löst, dass im Lösungsprozess ein Zusammenhang zwischen den Sys-

temen auf Gittern verschiedener Größe hergestellt und verwendet wird [1]. Dieses Vorgehen kommt unter den Bezeichnungen *Multigrid* und *Domain Decomposition* seit langem bei der numerischen Behandlung partieller Differenzialgleichungen zum Einsatz. Für die Gittereichtheorie musste wegen der Fluktuationen im Hintergrund-Gluonfeld allerdings eine innovative adaptive Komponente hinzugefügt werden. Abbildung 1 zeigt, dass im Vergleich zu den früheren Standardverfahren sehr große Gewinne in der Rechenzeit erreicht werden können, besonders dann, wenn in der Simulation realistische physikalische Parameter gesetzt sind. Die Rechenzeitgewinne sind in Abhängigkeit von der simulierten Quark-Masse dargestellt; weiter links befinden sich die realistischen Werte.

Für manche physikalischen Größen, insbesondere unter dem Einfluss starker Magnetfelder, ist die Erhaltung der sogenannten chiralen Symmetrie in der Diskretisierung notwendig. Die Simulation des resultierenden Neuberger-Operators wird dann noch aufwendiger, weil eine zusätzliche Approximationsaufgabe im Zusammenhang mit der Matrix-Signumsfunktion auftritt. Diese Problemstellung hat uns dazu motiviert – wie es für das Vorgehen in der Mathematik typisch ist – für den allgemeineren Fall einer ganzen Klasse von Matrixfunktionen neue Algorithmen zu entwickeln und ihr Verhalten theoretisch zu analysieren und abzusichern [2]. Zudem haben wir vor kurzem einen Weg gefunden, wie die neuen Lösungsverfahren für den Dirac-Wilson-Operator auch für den Neuberger-Operator nutzbar gemacht werden können [3]. Beide neuen Techniken zusammen reduzieren die Zeit für die Gleichungslösung in Gitter-QCD-Simulation um einen Faktor 10 oder mehr

– typischerweise sind das nun also nur noch drei Tage statt, wie früher, ein Monat.

Diese und ähnliche Resultate werden innerhalb des SFBs von verschiedenen Gruppen genutzt und teilweise auch für spezifische Anforderungen weiter entwickelt. Bei den Hardware-Projekten (QPACE und QPACE II, aber auch mit den *Hardware Innovation Labs* am *Supercomputing Centre* des Forschungszentrums Jülich) innerhalb des SFBs ist es immer wichtig, dass die „Arbeitspferde“ für Simulationsprogramme – und das sind in erster Linie die Gleichungslöser – auf der entwickelten Hardware besonders gut und effizient implementiert werden können. Wir kooperieren deshalb innerhalb des SFBs nicht nur mit den physikalischen Projekten, in denen unsere Verfahren zu verbesserten Simulationen beitragen, sondern auch mit den Hardwareprojekten in Bezug auf hardware-spezifische Software-Entwicklung. ☉

www.physik.uni-regensburg.de/sfbtr55

Literaturhinweise

- [1] Andreas Frommer, Karsten Kahl, Stephan Krieg, Björn Leder und Matthias Rottman: Adaptive aggregation based domain decomposition multigrid for the lattice Wilson Dirac Operator, *SIAM J. Sci. Comp.* 36, A1581-A1168 (2014)
- [2] Andreas Frommer, Stefan Güttel und Marcel Schweitzer: Efficient and stable restarts for matrix functions based on quadrature, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.* 35, 661-683 (2014)
- [3] James Brannick, Andreas Frommer, Karsten Kahl, Björn Leder, Matthias Rottmann und Artur Strebel: Multigrid preconditioning for the overlap operator in lattice QCD, eingereicht

AStA

Bergische Universität Wuppertal
www.asta.uni-wuppertal.de

Krabbelgruppe “Uni-Zwerge“

Bafög-Beratung

Rechtsberatung

Sozialberatung

AStA Shop

Der primordiale Feuerball auf dem Supercomputer



von / by

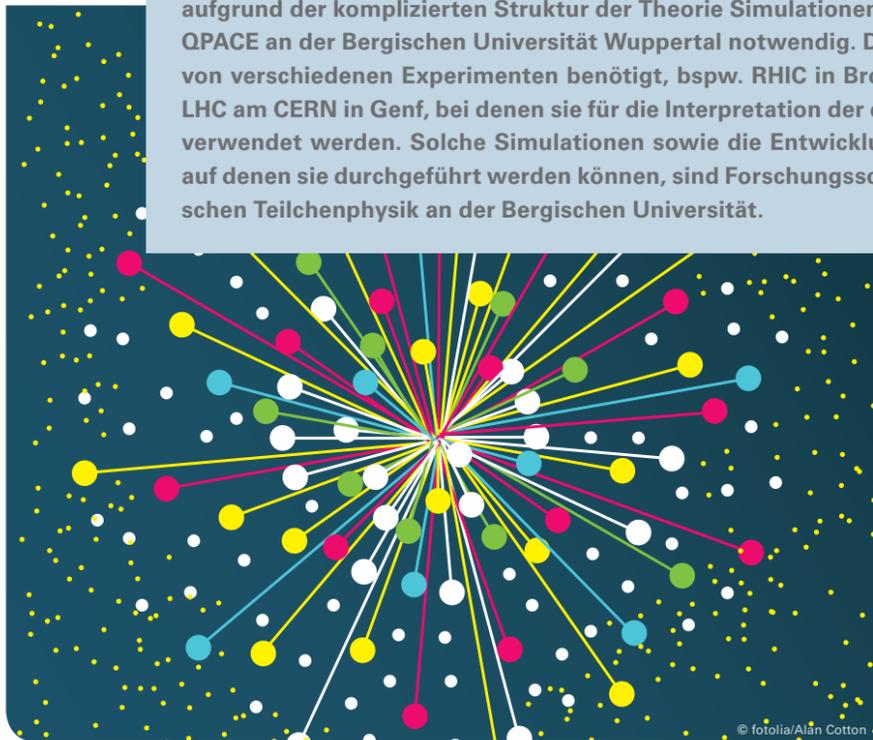
Prof. Dr. Zoltan Fodor und / and Dr. Stefan Krieg

fodor@physik.uni-wuppertal.de, krieg@uni-wuppertal.de

In the first split seconds after the Big Bang, the matter of the infant universe was in an extreme state known as quark-gluon-plasma. It consisted of quarks, gluons and leptons (e.g. electrons) and their antiparticles. Only with the further expansion and cooling of the universe could the familiar building-blocks of matter – for example hadrons such as protons and neutrons – form from the quarks and gluons. The transition between these “phases”, and the properties and structure of hadronic matter, are described by quantum chromodynamics – the theory of the strong force in the standard

model of elementary particle physics. Because of the complexity of this theory, predictions about the properties of primordial matter can only be derived with the help of supercomputers such as the University of Wuppertal’s QPACE. Such predictions are necessary to describe the results of current major experiments like the RHIC in Brookhaven, USA, or CERN’s LHC in Geneva. Simulations of this kind, and the development of the supercomputers on which they run, are research thrusts of the University of Wuppertal’s Department of Theoretical Particle Physics.

In den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall befand sich die Materie des jungen Universums in einem extremen Zustand, der als Quark-Gluon-Plasma bezeichnet wird und unter anderem aus Quarks, Gluonen und Leptonen (wie z.B. Elektronen) und deren Anti-Teilchen bestand. Erst als das Universum sich durch weitere Ausdehnung abkühlte, konnten sich die bekannten Bausteine der Materie, z.B. die Hadronen wie Protonen und Neutronen, aus den Quarks und Gluonen bilden. Der Übergang zwischen diesen „Phasen“ und auch die Eigenschaften und Struktur der hadronischen Materie werden durch die Quantenchromodynamik, der Theorie der starken Kraft im Standardmodell der Elementarteilchenphysik, beschrieben. Um nun aus dieser Theorie Vorhersagen über die Eigenschaften der Materie unter diesen extremen Bedingungen berechnen zu können, sind aufgrund der komplizierten Struktur der Theorie Simulationen auf Supercomputern wie QPACE an der Bergischen Universität Wuppertal notwendig. Diese Vorhersagen werden von verschiedenen Experimenten benötigt, bspw. RHIC in Brookhaven, USA, oder dem LHC am CERN in Genf, bei denen sie für die Interpretation der experimentellen Resultate verwendet werden. Solche Simulationen sowie die Entwicklung von Supercomputern, auf denen sie durchgeführt werden können, sind Forschungsschwerpunkte der Theoretischen Teilchenphysik an der Bergischen Universität.



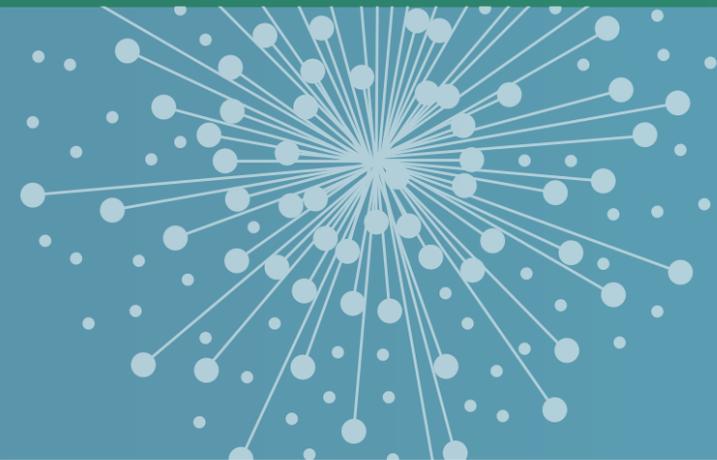
Nach dem Urknall durchlief das Universum verschiedene Epochen, die durch die relevanten Freiheitsgrade oder dominanten Phänomene der Epoche benannt werden. Die Quark-Epoche folgte dabei unmittelbar auf die Brechung der elektroschwachen Symmetrie durch das Higgs-Feld (Nobelpreis 2013), wodurch die Elementarteilchen ihre Massen erhielten. In der Quark-Epoche waren Quarks und Gluonen (die Kraft-Austauschteilchen der starken Kraft zwischen den Quarks, analog zum Photon bei der elektromagnetischen Wechselwirkung) aufgrund der vorherrschenden extremen Temperatur frei (Asymptotische Freiheit, Nobelpreis 2004), d.h. sie spürten die starke Wechselwirkung praktisch nicht. Diesen Zustand der Materie bezeichnet man als Quark-Gluon-Plasma. Mit der Symmetriebrechung begann die Quark-Epoche ca. 10^{-12} Sekunden nach dem Urknall und endete nach etwa 10^{-6} Sekunden, als sich das Universum durch Ausdehnung soweit abgekühlt hatte, dass die Quarks und Gluonen – ihre Freiheit verlierend – durch die starke Kraft zu Hadronen „gebunden“ wurden. Seit diesem Zeitpunkt gibt es in der Natur keine freien Quarks mehr, ein Phänomen, das als *Confinement* bezeichnet wird.

genannt), und dementsprechend auch Quarks und Gluonen aufweisen, wird im Moment des Zusammenstoßes durch die immense Energie der beteiligten Teilchen für einen Moment ein Quark-Gluon-Plasma erzeugt. Sobald dann das Plasma durch Ausdehnung wieder abkühlt, verbinden sich auch hier – wie im frühen Universum – Quarks und Gluonen zu Hadronen (bei der sog. *Chemical freeze-out*-Temperatur und -Dichte). Aus diesen Endzuständen des Experiments wird dann auf die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas zurückgeschlossen. Um diese Rekonstruktion der Bedingungen zum Zeitpunkt der Kollision durchführen zu können, wird die sogenannte Zustandsgleichung der Quantenchromodynamik benötigt. Diese kann nur über Simulationen der Theorie berechnet werden.

Gegenwärtig laufen umfassende Experimente, die zum Ziel haben, mit dem Teilchenbeschleuniger sinnbildlich in der Zeit „zurückzureisen“, um die Quark-Epoche und den Übergang zu der folgenden Hadronen-Epoche im Experiment nachzustellen. Dazu werden besonders massive Atomkerne, etwa von Gold oder Blei, auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und anschließend zur Kollision gebracht. Da diese schweren Kerne eine große Anzahl von Protonen und Neutronen (zusammenfassend Nucleonen

Die Notwendigkeit, die Theorie zu simulieren, ergibt sich aus dem Umstand, dass Quarks und Gluonen bei niedrigen Temperaturen nicht frei sind. So tragen z.B. die geringen, über den Higgs-Mechanismus erzeugten Quarkmassen nur ca. 5% zur Masse der Protonen und Neutronen bei (Gluonen sind masselose Teilchen). Der Großteil der Masse beruht auf den komplizierten Prozessen innerhalb der Nucleonen: Gluonen wechselwirken nicht nur mit Quarks, sondern auch untereinander. Da zudem, gemäß der quantenmechanischen Unschärfeleration, die Anzahl der Teilchen in den Nucleonen nicht fest ist, tauchen permanent „virtuelle“ Quarks und Gluonen auf und tragen dadurch, obwohl sie unmittelbar wieder verschwinden, zur Masse der Nucleonen bei. Diese komplizierten Prozesse vollständig zu berücksichtigen ist nur durch Simulation der Theorie möglich.

Die Gestaltung der Simulationen spielt dabei eine entscheidende Rolle. Startpunkt ist immer die auf ein



Raum-Zeit-Gitter diskretisierte Theorie. Bei der Konstruktion dieser Diskretisierung gibt es, solange einige grundlegende Bedingungen eingehalten werden, viel Spielraum. Daher unterscheiden sich auch die Ansätze der verschiedenen Gruppen, die aktiv in diesem Feld forschen, mitunter deutlich voneinander. Unser Ansatz, bei der Konstruktion theoretische Vorzüge sorgfältig mit dem Rechenzeitaufwand auszubalancieren, war dabei besonders erfolgreich. So waren wir die ersten, die 2006 die Eigenschaften des Übergangs zwischen Quark-Gluon-Plasma und der hadronischen „Phase“ (Nature 443, 675) und 2008 die Massen der leichten Hadronen (Science 322, 1224) bei vollständiger Kontrolle der verschiedenen systematischen Unsicherheiten berechnen konnten. Unsere so etablierten Methoden haben wir unter anderem dazu eingesetzt, die Temperaturskala, bei der dieser Übergang stattfand, zu berechnen. Unser Resultat aus dem Jahre 2006 (Phys. Lett. B 643, 46) war dabei im Feld zunächst umstritten. Auch bei inkrementeller Verbesserung der Genauigkeit unserer Resultate, etwa durch Erhöhung der Statistik in den Jahren 2009 (JHEP 0906 088) und 2010 (JHEP 1009 073), blieben unsere Resultate stets konsistent. Die beobachtete Inkonsistenz zwischen unseren und den Resultaten anderer Gruppen verschwand im Jahr 2011, als diese notwendige methodische Änderungen implementierten und damit ihre Rechnungen ergänzten. 2012 erweiterten wir dann unsere Arbeiten und untersuchten die Abhängigkeit der Temperaturskala von einem starken äußeren magnetischen Feld (JHEP 1202 044). Hier konnten wir zeigen, dass verschiedene Modellansätze in der Literatur fälschlicherweise einen Anstieg der Temperatur mit dem Feld vorhersagen, während unsere Ergebnisse, die

auf der vollen Theorie beruhen, tatsächlich ein Sinken derselben zeigen.

Bis Mitte dieses Jahres bestand, ganz ähnlich zu dem im letzten Abschnitt beschriebenen Fall, eine erhebliche Diskrepanz zwischen unseren und den Resultaten anderer Gruppen für die Zustandsgleichung der Quantenchromodynamik – einer, wie eingangs erwähnt, für die Analyse laufender Experimente notwendigen Größe. Diese Diskrepanz bestand über mehrere Jahre; die Abweichungen zwischen den Gruppen erreichten sogar teilweise 50% bei einigen besonders wichtigen Temperaturen. Unsere Arbeit aus dem Jahre 2010 (JHEP 1011 077), in der wir die Zustandsgleichung für einen großen Temperaturbereich bestimmen konnten (diese, wie auch die eingangs erwähnten Resultate, zählen in den letzten Jahren zu den Top10 meistzitierten Arbeiten des Feldes weltweit), haben wir 2013 noch einmal bestätigt (Phys. Lett. B730 99). Hier verschwanden die Diskrepanzen schließlich, als die anderen Gruppen Mitte des Jahres ihre Resultate ebenfalls im sogenannten Kontinuums-Limes (durch

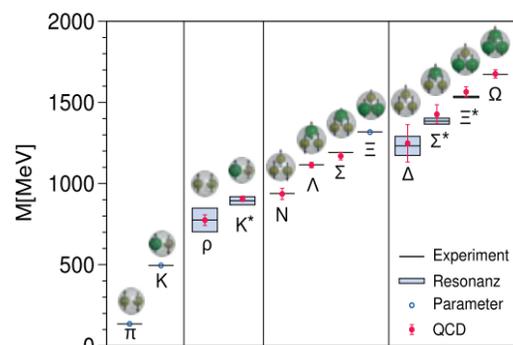


Abb. 1: Spektrum der leichten Hadronenmassen (Science 322 1224). Dieses Resultat unserer Simulationen wurde von Science 2008 in die Top-10 der wissenschaftlichen Durchbrüche des Jahres gewählt.

Abb. 2: QPACE an der Bergischen Universität war 2009 und 2010 der energieeffizienteste Supercomputer weltweit. Der Rechner wurde im Rahmen des SFB TRR 55 entwickelt.



welchen Diskretisierungsfehler entfernt werden) bestimmen konnten.

Unsere Methoden erlaubten uns 2013 zum ersten Mal direkten Kontakt mit den erwähnten Experimenten herzustellen, als wir unsere theoretisch berechneten Resultate für die Verteilungen der Event zu Event Fluktuationen der Baryonenzahl und der elektromagnetischen Ladung mit den experimentellen Ergebnissen verglichen haben (Phys. Rev. Lett. 111 062005). Daraus konnten wir ab-initio, also ohne weitere Modellannahmen, Werte für die zentralen (Chemical freeze-out) Parameter des Experimentes bestimmen. Diese Ergebnisse konnten wir in diesem Jahr noch einmal erweitern (Phys. Rev. Lett. 113, 052301) und insbesondere zeigen, dass die über die Baryonenzahl oder Ladung bestimmten Parameter untereinander konsistent und auch mit unabhängigen Modell-Resultaten übereinstimmen.

Simulationen, wie wir sie durchführen, benötigen besonders leistungsfähige Computer; besondere Fortschritte bringen aber Verbesserungen im Bereich der Algorithmik/Methodik. Auf der Seite der Rechner ha-

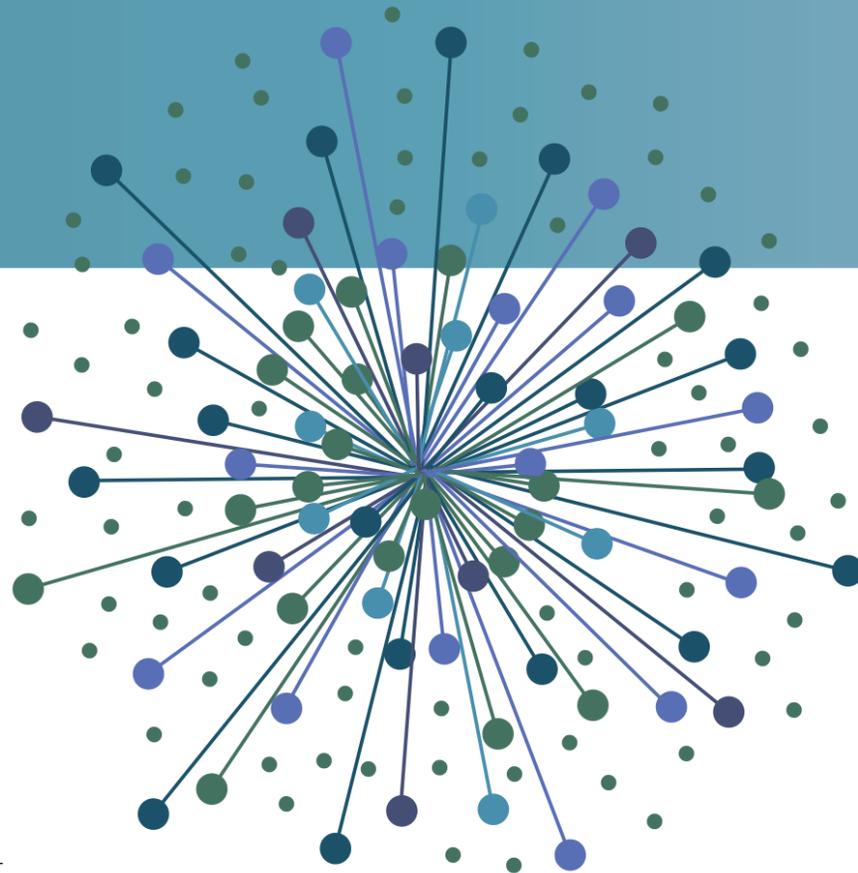
ben wir durch Eigenentwicklungen zum Fortschritt des Feldes beigetragen. Hier sind insbesondere GPU basierte Systeme anzuführen, bei deren Anwendung wir seit 2005 Pionierarbeiten geleistet haben (Comput. Phys. Commun. 117 631). Dies ist eine Tradition der Elementarteilchenphysik in Wuppertal, die z.B. 2004 mit dem Clustercomputer ALICE next den seinerzeit leistungsfähigsten Rechner an einer deutschen Universität entwickelt hatte. Diese Entwicklung setzt sich jetzt im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 55 „Hadron Physics from Lattice QCD“ (SFB TRR 55), der Universitäten Wuppertal, Regensburg und Graz fort. In der ersten Förderperiode entwickelte der SFB unter Federführung von Prof. Wettig (Regensburg), Prof. Pleiter (Regensburg und Jülich) mit maßgeblicher Beteiligung des Jülich Supercomputing Centre am Forschungszentrum Jülich, unter der Leitung von Prof. Lippert (Wuppertal und Jülich), das dedizierte System QPACE, in den Jahren 2009 und 2010 der energieeffizienteste Supercomputer weltweit. In der zweiten Förderperiode (2013–2016) entwickelt der SFB den Nachfolger zu QPACE –

Der primordiale Feuerball auf dem Supercomputer

QPACE II –, der erneut speziell auf die Bedürfnisse der Simulationen in der Gittereichtheorie optimiert wird. Auch im Bereich der Algorithmik/Methodik haben wir entscheidende Beiträge geleistet, die oftmals Simulationen überhaupt erst möglich gemacht haben. So haben wir Simulationsalgorithmen für Overlap-Fermionen entwickelt, eine theoretisch besonders ansprechende Diskretisierung der Quantenchromodynamik, die heute als einzige Verfahren überhaupt Simulationen, ohne Verursachung weiterer systematischer Unsicherheiten durch die verwendeten Verfahren, ermöglichen. Wir haben Pionierarbeiten bei der Berücksichtigung der elektromagnetischen Wechselwirkung in Simulationen geleistet (z.B. Phys. Rev. Lett. 111 252001) und – zusammen mit Kollegen aus der Fachgruppe Mathematik an der Bergischen Universität – neue und signifikant effizientere Gleichungslöser entwickelt und implementiert.

Mit diesen leistungsfähigen Systemen und Algorithmen konnten wir nun einen weiteren wichtigen Schritt gehen: die präzise Berechnung der Massendifferenz zwischen Protonen und Neutronen. Der winzige Unterschied der Ruhmassen der beiden Kernbausteine ist entscheidend für die Stabilität der Materie. Wäre z.B. das Proton nur ein klein wenig leichter, wäre nicht einmal das Wasserstoffatom stabil, sondern würde in ein Neutron zerfallen. Eine größere Masse würde die Kernfusion in Sternen und die Erzeugung von den Elementen in Supernovae schwieriger machen. Wie sehr der in

der Natur gefundene Wert daher präzise eingestellt ist, um eine Welt wie die unsrige erst möglich zu machen (Anthropisches Prinzip), kann nur über Simulationen geklärt werden, die neben der starken auch die elektromagnetische Wechselwirkung voll berücksichtigen. Dabei konnten jetzt wir nicht nur die Massendifferenz zwischen Proton und Neutron extrem präzise messen, sondern auch entsprechende Massensplittings für andere Teilchen des Spektrums – mit verschiedenen Vorhersagen an zukünftige Experimente. Aus unseren Resultaten lässt sich nun die Anwendbarkeit des Anthropischen Prinzips für das Proton-Neutron Splitting untersuchen, da wir das Massensplitting als Funktion der elektrischen Ladungen und Massen der Quarks, auch abseits der in der Natur gefundenen Werte, darstellen können. ©



Menschen bei Gira Sie sind Pioniere, Gipfelstürmer, Organisationstalente und Idealisten. Sie lieben ungewöhnliche Projekte, können zupacken und setzen sich für ihre Ideen ein. Mitarbeiter mit unterschiedlichen Leidenschaften und Fähigkeiten verbinden sich zu einem der innovativsten Unternehmen seiner Branche. Gira versteht das Vertrauen in seine Mitarbeiter als wesentliche Grundlage für Pionierleistungen. Gira begeistert sich für Spitzenleistungen und ist bereit, außergewöhnliche Wege zu gehen, was ohne Verbindlichkeit und Verlässlichkeit nicht gelingt. Gira ist ein Arbeitgeber, der gefordert werden will und den Mitarbeitern auch in schwierigen Situationen zur Seite steht.

Mehr Menschen bei Gira und mehr über Gira als Arbeitgeber: arbeitgeber.gira.de

Ausgezeichneter Arbeitgeber Gira wurde mehrfach als einer der besten Arbeitgeber Deutschlands ausgezeichnet, u. a. mit dem Siegel „Top Nationaler Arbeitgeber 2014“ des Nachrichtenmagazins FOCUS sowie mit der Auszeichnung „Deutschlands Beste Arbeitgeber 2014“ und „Deutschlands Beste Arbeitgeber 2013“ des Instituts Great Place to Work®.

Elektronische Industrie – Mathematics inside



von / by

Dr. Andreas Bartel, Prof. Dr. Michael Günther,
und / and Dr. Jan ter Maten

guenther@math.uni-wuppertal.de, bartel@math.uni-wuppertal.de,
termaten@math.uni-wuppertal.de

Computer, Tablets oder Handys bestehen aus hochintegrierten elektronischen Schaltungen mit Millionen bis Milliarden von (Halbleiter-)Bauteilen. Wie schaffen es dabei die Hersteller bei ständig kürzer werdenden Produktzyklen, neue, immer leistungsfähigere Produkte zu entwickeln? Mit Mathematik!

Die rasante Zunahme der Rechenleistung bis heute haben der Mathematik völlig neue Arbeitsgebiete eröffnet. Neben den klassischen Erkenntniszugängen, Theorie und Praxis, hat sich eine dritte Methode zur Erkenntnisgewinnung etabliert: die numerische Simulation. Ob beim Chip-Design, dem Crash-Test oder der Auslegung von Motoren, häufig prüft heute der Designer seinen Konstruktionsentwurf in der Simulation auf „Herz und Nieren“, bevor ein Prototyp tatsächlich hergestellt wird. So ist die Simulation in der industriellen Entwicklung nicht mehr wegzudenken. Natürlich wird heute Simulation auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt, die über die Industrie hinausführen und sogar bis in unser tägliches Leben hineinragen.

Doch was ist mit „numerischer Simulation“ genau gemeint? Der Wortherkunft nach schwingen bei dem Begriff „Simulation“ auch die Bedeutungen „vortäuschen, markieren, so tun also ob“ mit, die hier natürlich nicht gemeint sind. Man würde daher besser von „Nachbildung“ sprechen. Die VDI-Norm 3633 definiert den Begriff wie folgt: „Simulation ist das Nachbilden eines

Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

In unserem Verständnis treten an die Stelle von realen Objekten (wie z. B. einem Computer-Chip) mathematische Modelle, mit denen experimentiert wird – kurz gesagt: „Simulation ist das Experiment am mathematischen Modell“. So ersetzt die Simulation zeitaufwendige, kostenintensive, reale Experimente, bzw. Experimente, die technisch schwer oder kaum realisierbar sind. Das macht die numerische Simulation zu einer tragenden Säule bei der Entwicklung hochkomplexer (technischer) Systeme. Die Formulierung „Hochtechnologie ist mathematische Technologie“ fasst diesen Fakt sehr prägnant zusammen.

Der Lehrstuhl für Angewandte Mathematik/Numerische Analysis an der Bergischen Universität beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit drei Anwendungsfeldern der numerischen Simulation: *Computational Physics*, *Computational Finance* und *Computational Electronics*. Während in den ersten beiden Gebieten

Computers, tablets and cell-phones consist of highly integrated electronic circuits with millions or even billions of (semi-conductor) components. How do manufacturers manage to develop new, ever more powerful devices in the face of increasingly rapid product cycles? The answer is: with mathematics. ☉

Fragen nach den grundlegenden Eigenschaften der kleinsten Bausteine der Materie (siehe Beitrag von Prof. Frommer, S. 18–22) oder nach der fairen Preisgestaltung von Finanzderivaten und Risikostreuung von Anlageportfolios stehen (siehe Beitrag von Prof. Ehrhardt, BUW.OUTPUT Nr. 9), beschäftigen wir uns im dritten Gebiet, der Computational Electronics, mit dem automatischen Entwurf von elektronischen Bauteilen und Systemen. Drei Forschungsfragen stehen dabei im Vordergrund:

1. *Uncertainty Quantification (UQ)*: Wie kann man Unsicherheiten in den Daten, die durch Messfehler, Variationen in der Produktion oder unzureichende Modelle verursacht sein können, in der Simulation berücksichtigen, um zu Aussagen bezüglich Produktionsausschuss, Lebensdauer und gesicherter Funktionalität zu gelangen?

2. *Multiphysics-Simulation*: Komplexe, technische Systeme bestehen in der Regel aus einer Vielzahl von Teilsystemen, die durch unterschiedliche physikalische Größen (zum Beispiel elektrischer Strom, magnetische Feldstärke und Temperatur) beschrieben werden. Im industriellen Kontext werden diese Teilsysteme mit einer jeweils spezifischen Software modelliert und simuliert. Wie kann man nun diese verschiedenen Programm-Pakete so miteinander verbinden und synchronisieren, dass das dynamische Verhalten des Gesamtsystems möglichst effizient und genau genug simuliert werden kann?

3. *Model Order Reduction (MOR)*: Oft sind bereits die verfügbaren mathematischen Modelle derartig komplex, dass eine vollständige numerische Simulation sehr aufwendig ist. Zudem verlangt die Optimierung sehr häufig,

fig, dass solche Systeme viele Male zu berechnen sind, um ein bestmögliches System zu bestimmen. Wie kann man nun die Komplexität der mathematischen Modelle für das Gesamt- oder auch die Teilsysteme verringern, damit der Rechenaufwand und somit die Simulationskosten in einem industriellen Kontext vertretbar sind, ohne dabei die erforderte Genauigkeit der wesentlichen Prozesse aufzugeben?

Dieser Beitrag soll aufzeigen, wie wir zusammen mit Kooperationspartnern aus Universitäten und Industrie in zwei aktuellen Forschungsverbänden, SIMUROM und KoSMos, versuchen, Antworten auf diese drei Forschungsfragen zu finden.

SIMUROM-PROJEKT: EFFIZIENZSTEIGERUNG BEI ENERGIE-WANGLERN

Im Zeichen der anstehenden Verknappung fossiler Brennstoffe und der Energiewende nimmt die Bedeutung von elektrischen Motoren immer mehr zu. Man denke beispielsweise an Motoren, wie sie in Elektroautos

SIMUROM-Steckbrief

Name:	Simulation und robuste Optimierung von elektromechanischen Energiewandlern unter Berücksichtigung von Unsicherheiten
Geldgeber:	BMBF (Mathematikprogramm, 2013–2016)
Partner:	TU Darmstadt, Uni Hamburg
Industrie:	Bosch GmbH, CST AG
Ziele:	Effizienzsteigerung von Elektromotoren durch verbesserte Simulationssoftware (mit UQ)
Web:	www.simurom.org

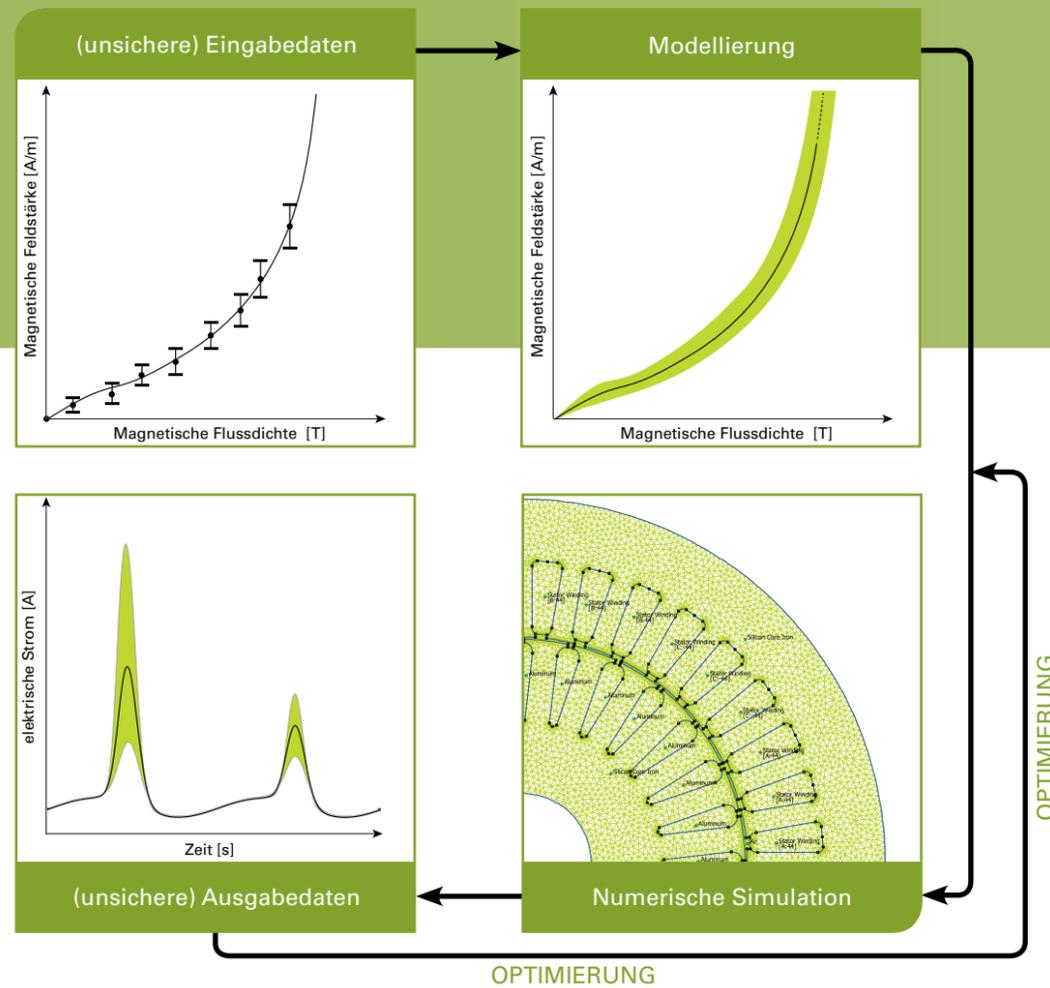


Abb. 1: Arbeitsfluss mit unsicheren Daten und Optimierung.

und -fahrrädern oder Haushaltsgeräten vorkommen. Neben der Verbesserung von Akkumulatoren gilt es insbesondere auch, die Effizienz solcher Maschinen weiter zu steigern. Dies bedeutet eine Weiterentwicklung am technischen Limit dieser Geräte.

Um diese Fragestellung zu beantworten wurde unser Forschungsverbund SIMUROM gegründet. Während unser Praxispartner, die Bosch GmbH, u.a. E-Motoren entwickelt und baut, entwickelt und vertreibt die CST AG Simulationsumgebungen zur Berechnung elektromagnetischer Felder. So hat SIMUROM zum Ziel, neue mathematische Methoden zu erarbeiten, welche das technische Design von Motoren sowohl zuverlässiger als auch effizienter machen.

Warum braucht man dafür neue Mathematik? Differentialgleichungen gibt es seit mehreren hundert Jahren,

was ist hier noch neu? Die Antworten darauf sind sehr vielfältig, wir geben einen Überblick:

In einem Motor sind neben den elektromagnetischen Feldern (die durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden) auch die Bewegung des Rotors (Bewegungsgleichung) sowie thermische Effekte (Wärmeleitungsgleichung) zu berücksichtigen. Man spricht hier von gekoppelten Systemen, bzw. auch von *Multiphysics*. Insbesondere ist die zugrundeliegende Geometrie auch durch verschiedene Materialien kompliziert. Solche mathematischen Modelle sind nicht mehr analytisch (mit Papier und Bleistift) zu lösen, sondern können nur noch simuliert werden. Aber selbst das ist heute nicht immer direkt möglich, da die Teile (z.B. das magnetische Feld und die Rotorbewegung) ganz unterschiedliches numerisches Verhalten

Exkurs: Co-Simulation/Dynamische Iteration

Hierbei wird eine numerische Approximation

$$(\bar{y}, \bar{z})^T : [t_0, t_e] \rightarrow \mathbb{R}^{n_y} \times \mathbb{R}^{n_z}$$

der Lösung (y, z) des DAE-Anfangswertproblems (vom Index-1)

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(y, z), & y(t_0) &= y_0, \\ 0 &= g(y, z), \end{aligned}$$

im Zeitbereich bestimmt. Zur Konvergenzbeschleunigung zerlegt man den Zeitbereich $[t_0, t_e]$ in kleinere Zeitfenster durch:

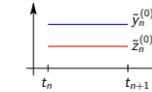
$$t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < \dots < t_e.$$

Liegt nun eine Näherung bereits für $t \in [0, t_n]$ vor, so berechnet man im nächsten Zeitfenster $[t_n, t_{n+1}]$ eine numerische Approximation, $\bar{y}|_{(t_n, t_{n+1}]}, \bar{z}|_{(t_n, t_{n+1}]}$, wie folgt:

- **Extrapolationsschritt:** man beginnt mit

$$\begin{pmatrix} \bar{y}_n^{(0)} \\ \bar{z}_n^{(0)} \end{pmatrix} := \Phi_n \begin{pmatrix} \bar{y}|_{(t_{n-1}, t_n]} \\ \bar{z}|_{(t_{n-1}, t_n]} \end{pmatrix}$$

einer Extrapolation Φ_n , die die Näherung (\bar{y}, \bar{z}) von $[t_{n-1}, t_n]$ nach $[t_n, t_{n+1}]$ fortsetzt.



- **Iterationsschritt:** der k -te Iterationsschritt (mit $k = 1, \dots, k_n$) definiert eine Abbildung

$$\begin{pmatrix} \bar{y}_n^{(k-1)} \\ \bar{z}_n^{(k-1)} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \bar{y}_n^{(k)} \\ \bar{z}_n^{(k)} \end{pmatrix} := \Psi_n \begin{pmatrix} \bar{y}_n^{(k-1)} \\ \bar{z}_n^{(k-1)} \end{pmatrix}$$

Zur Entkopplung werden in jeder Iteration die Kopplungsvariablen eingefroren – Bezeichnung $(k-1)$. So können die Subsysteme getrennt gelöst werden. Mathematisch werden die Funktionen f, g des DAE-System zu (klug gewählten) kompatiblen Splittingfunktionen F, G und es entsteht die DAE:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{y}}_n^{(k)} &= F(\bar{y}_n^{(k)}, \bar{y}_n^{(k-1)}, \bar{z}_n^{(k)}, \bar{z}_n^{(k-1)}), & \bar{y}_n^{(k)}(t_n) &= \bar{y}_n^{(k-1)}(t_n), \\ 0 &= G(\bar{y}_n^{(k)}, \bar{y}_n^{(k-1)}, \bar{z}_n^{(k)}, \bar{z}_n^{(k-1)}). \end{aligned}$$

Ψ_n stellt den Lösungsoperator dieses Systems dar und die Kompatibilität bedeutet, dass hierbei gilt

$$F(y, y, z, z) = f(y, z) \quad \text{und} \quad G(y, y, z, z) = g(y, z).$$

Die Konvergenz dieses Ansatzes hängt von mehreren Dingen ab: der Art der Kopplung, deren Behandlung, der Reihenfolge, der jeweiligen Wahl des Extrapolations- und Iterationsverfahrens.

aufzeigen. Dazu gibt es kluge Verfahren wie die Co-Simulation, die es uns erlauben, verschiedene Simulatoren bzw. auch einfach Teilsysteme zu entkoppeln und getrennt zu berechnen. Um am Ende trotzdem eine genäherte Lösung für das multiphysikalische System zu erhalten, muss man einen Preis zahlen.

Es ist nötig durch eine Iteration, d.h. durch eine Schleife über alle Teilsysteme, immer wieder jedes Teilsystem zu lösen, um so immer besser eine Lösung des gekoppelten Systems zu erhalten. Deshalb spricht man auch von dynamischer Iteration. Nun muss eine solche Serie von Ergebnissen sich aber auch stabilisieren, sich immer weniger ändern, damit man wirklich die Lösung des Gesamtsystems beschreibt. Der Mathematiker spricht davon, dass die Iteration konvergieren muss. Wir wissen, dass dieses Verhalten vom Typ der Gleichungen, der Kopplung, der Reihenfolge abhängt.

Es kommt noch schlimmer: Einzelne Bauteile werden nur mit einer gewissen Toleranz produziert, d.h. jedes Teil ist nicht immer gleich. Zudem verändert sich das Material über die Zeit, aber das E-Bike soll natürlich weiter funktionieren. All das ist in der Mathematik umzusetzen (UQ). Dies geschieht bei uns durch das sogenannte polynomiale Chaos. Diese Methode beschreibt keineswegs Chaos, sondern ein Modell mit Wahrscheinlichkeiten. Darunter leidet natürlich die Co-Simulation. Unsere Untersuchungen und Entwicklungen zielen nun

auch darauf, noch intelligentere Verfahren zu entwickeln, die die Konvergenz verbessern.

Schließlich soll am Ende ein optimiertes Gerät entstehen. Dazu sind dann immer mehrere Entwürfe zu rechnen. Damit dies auch effizient geschieht, entwickeln die Kollegen in Darmstadt und Hamburg neue, angepasste Optimierungsverfahren, die auf vereinfachten mathematischen Modellen des Motors basieren (MOR mit Multileveloptimierung). Abbildung 1 stellt unseren Arbeitsfluss dar. Am Ende profitieren alle von den verbesserten Modellen und Algorithmen – sogar der Radfahrer (Abb. 2).

Abb. 2: Motor für E-Bike (Bosch AG).



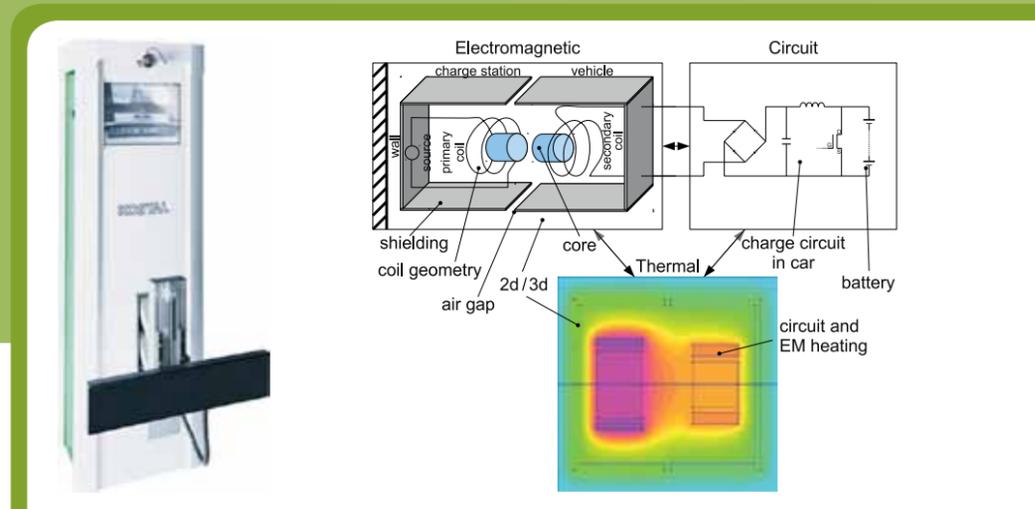


Abb. 3: Prototyp einer induktiven Ladevorrichtung für Elektroautos (Kostal GmbH), Säule (links), Multiphysik-Modell (rechts).

KOSMOS-PROJEKT: INDUKTIVES LADEN VON ELEKTROFAHRZEUGEN

Der Umstieg von Fahrzeugen mit klassischem Verbrennungsmotor auf Elektrofahrzeuge ist nicht nur aus ökologischen Gründen sinnvoll, sondern er passt auch ideal zu einer dezentralen Energiegewinnung (z. B. aus Solarzellen), die für einen Erfolg der Energiewende notwendig wird.

Essentiell für die Akzeptanz und den Erfolg der E-Mobilität ist ein problemloses, sicheres Aufladen des Elektrofahrzeuges. Hierzu hat unser Industriepartner KOSTAL GmbH ein Gerät entwickelt, das das Aufladen eines Pkw in der Privatgarage ermöglicht, ohne umständlich mit Kabeln hantieren zu müssen. Das Fahrzeug muss lediglich geparkt werden; das Aufladen der Batterien im Auto erfolgt dann durch eine an der Garagenwand angebrachte Vorrichtung induktiv über eine hinter dem Nummernschild angebrachte Spule.

Die optimale Auslegung der Apparatur erfordert die mehrfache numerische Simulation eines multiphysikalischen Modells, das die Maxwell'schen Gleichungen (zur örtlichen Auflösung der erzeugten elektromagnetischen Felder), Netzwerkgleichungen (Regelschaltung zur Ladung mit Batterie im Auto) und die Wärmeleitungsgleichung (Ausbreitung der durch die elektromagnetischen Felder erzeugten Wärme) koppelt

(Abb. 3). Insbesondere werden diese Simulationen auch zum Nachweis der elektromagnetischen Kompatibilität an vorgegebenen Positionen benötigt.

Um die Aufheizung während des Ladevorganges zu untersuchen, wurde ein mathematisches Modell mit vereinfachter Geometrie entwickelt, die aber alle wesentlichen Eigenschaften erhält. Eine naive Simulation des gekoppelten Systems würde das Gesamtsystem auf der schnellsten Zeitskala abtasten. Dies hätte mehrere Millionen Male pro Minute zu erfolgen und wäre somit äußerst aufwendig. Reformuliert man das Modell als hybrides Modell im Frequenz-Zeit-Bereich, so genügt bereits eine Auswertung des thermischen Modells pro Minute, ohne wesentliche Abstriche an der erziel-

KoSMos-Steckbrief

Name: MOR-basierte Simulation von gekoppelten PDAE-Systemen
Geldgeber: BMBF (Mathematikprogramm, 2013–2016)
Partner: Uni Augsburg, HU Berlin
Industrie: Kostal GmbH, CST AG
Ziele: schnelle, modellreduktionsbasierte Simulationstechniken für gekoppelte PDAE-Systeme bei modularer Systemstruktur mit höherer Genauigkeit und mehr Robustheit
Web: <http://scwww.math.uni-augsburg.de/projects/kosmos/>

Exkurs: Modellordnungsreduktion (MOR)

In vielen technischen Anwendungen wird der Zusammenhang $y = \Phi(u)$ zwischen zeitabhängigen Eingängen $u(t) \in \mathbb{R}^{n_u}$ und Ausgängen $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ durch ein dynamisches System

$$0 = f(x, \dot{x}, u), \quad y = g(x, u)$$

in den Zustandsvariablen $x(t) \in \mathbb{R}^{n_x}$ beschrieben. Letztere sind für den Anwender oft nicht von Interesse — allein der Zusammenhang zwischen Eingängen u und Ausgängen y ist entscheidend. Ziel von Modellordnungsreduktionsverfahren ist es nun das Eingangs-Ausgangs-Verhalten durch ein kompakteres dynamisches System zu beschreiben, welches auf einen modifizierten Zusammenhang $y = \tilde{\Phi}(u)$ führt. Man wird nur dann auf das reduzierte System zurückgreifen, wenn

- der Approximationsfehler $\|\Phi(u) - \tilde{\Phi}(u)\|$ in einer geeigneten Norm klein genug ist,
- wichtige Eigenschaften des ursprünglichen Systems wie Stabilität, Passivität, usw. erhalten bleiben und
- sich der Reduktionsprozess effizient berechnen lässt.

Wir skizzieren kurz das prinzipielle Vorgehen am Beispiel eines linearen Systems:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du.$$

Nun ist es das Ziel, die n_x -dimensionale Zustandsvariable x gut in einem m_x -dimensionalen Unterraum \mathcal{V} zu approximieren, der durch die Spalten einer Matrix $V \in \mathbb{R}^{n_x \times m_x}$ aufgespannt wird $x(t) \approx Vz(t)$. Wird diese Approximation in die Differentialgleichung eingesetzt entsteht i.A. ein Residuum. Daher fordert man, dass dieses Residuum orthogonal zu einem Testraum \mathcal{W} ist, den wir durch die Spalten einer Matrix $W \in \mathbb{R}^{n_x \times m_x}$ aufspannen können. Falls nun beide Matrizen biorthogonal (d.h., $W^T V = Id$) sind, so definiert das reduzierte Problem

$$\dot{z} = (W^T AV)z + (W^T B)u, \quad y = (CV)x + Du,$$

die Projektion des ursprünglichen Problems auf den Unterraum \mathcal{V} entlang dem Testraum \mathcal{W} (Petrov-Galerkin-Verfahren). Die jeweilige Modellordnungsreduktionsmethode, etwa Krylov-Verfahren und POD (Proper Orthogonal Decomposition) unterscheidet sich nun in der Konstruktion der beiden Matrizen V und W .

ten Genauigkeit. Die Rechenzeit wird dabei von mehreren Jahren auf einige Sekunden verringert.

Beiden Projekten ist gemeinsam, dass aktuelle politische Entscheidungen wie die Energiewende neue Anforderungen an die Industrie stellen, die nur durch Weiterentwicklungen im Bereich der numerischen Simulation erfüllt werden können. Auch das am 1. November 2013 angelaufene EU-Projekt nanoCOPS, das vom Lehrstuhl für Angewandte Mathematik/Numerische Analysis der Bergischen Universität Wuppertal koordiniert wird, hat zum Ziel, das mathematische Rüstzeug für die numerische Simulation zur Lösung komplexer Probleme in der Nanoelektronik bereitzustellen. Am Ende sollen dann Bau-

teile entwickelt werden können, die sich durch eine besonders hohe Energieeffizienz und lange Lebensdauer auszeichnen. Auch das ist ein Beitrag zum Erfolg der Energiewende. ☉

www-num.math.uni-wuppertal.de

Literaturhinweise

G. Ali et al.: *Parabolic differential-algebraic models in electric network design*; SIAM J. MMS 4 (2005) 3, pp. 813–838.
 A.C. Antoulas et al.: *Model Order Reduction – Methods, Concepts and Properties*; Erscheint in: Günther, M. (Hrsg.): COMSON-Handbook, Springer-Verlag, 2014.
 A. Bartel et al.: *Dynamic iteration for coupled problems of electric circuits and distributed devices*; SIAM J. Sci. Comput., 35:2 (2012), pp. B315–B335.
 Ch. Kaufmann et al.: *Efficient frequency-transient co-simulation of coupled heat-electromagnetic problems*; Journal of Mathematics in Industry 2014:4:1.
 A. Sandu, M. Günther: *A generalized-structure approach to additive Runge-Kutta methods*; Erscheint in SINUM.

nanoCOPS-Steckbrief

Name: Nanoelectronic Coupled Problems Solutions
Geldgeber: ICT/EU FP-7 (Specific Targeted Research Project)
Partner: TU Darmstadt, HU Berlin, Uni Greifswald, TU Brün, MPI Magdeburg, KU Leuven, FH Oberösterreich
Industrie: NXP Semiconductors, ON Semiconductor, Magwel NV, ACCO Semiconductor
Ziele: Lösung komplexer Probleme der Nanoelektronik, Kopplung, Materialermüdungsprozesse, Multirate-Zeitintegration, Co-Simulation, UQ und MOR
Web: <http://fp7-nanocops.eu>

Schadstoffemissionen der Luftfahrt



von / by

Prof. Dr. Peter Wiesen, Dr. Ralf Kurtenbach, Michael Gallus, Stefanie Ifang und / and Prof. Oleksander Zaporozhets, Dr. Kateryna Synylo (National Aviation University NAU, Kiev, Ukraine)

wiesen@uni-wuppertal.de, kurtenba@uni-wuppertal.de, m.gallus@uni-wuppertal.de, s.ifang@uni-wuppertal.de

Der zivile Luftverkehr ist einer der größten Wachstumsmärkte weltweit und für die europäische Wirtschaft von enormer Bedeutung. Die Entwicklung neuer umweltfreundlicher Flugzeuge mit deutlich geringeren Schadstoffemissionen ist das Ziel der europäischen Luftfahrtindustrie. So soll der Einfluss der Luftfahrt auf die Atmosphäre und das Klima trotz der erwarteten weiteren starken Zunahme des Luftverkehrsaufkommens minimiert werden.



Abb. 1: Der Flughafen Kiew-Boryspol (IATA Code KBP) ist der internationale Verkehrsflughafen der ukrainischen Hauptstadt Kiew. Er ist der wichtigste Flughafen des Landes und liegt 29 Kilometer östlich des Stadtzentrums.

© Vasily Koba

Civil aviation is today a major global growth market and a key factor for European industry. The development of new, environmentally friendly airplanes with significantly lower levels of pollutant emission is the leading goal of the European aviation industry. Its attainment will, it is hoped, minimize the impact of aviation on the atmosphere and climate, despite the expected increase in airborne traffic.

Die weltweit ständig steigende Zahl der Flugpassagiere erfordert die Vergrößerung der Kapazitäten großer Flughäfen, wie z. B. Frankfurt, London Heathrow, Amsterdam oder Paris. Im Flughafennahbereich sind Flugzeugemissionen eine bedeutende Quelle von Luftschadstoffen. Deren Überwachung ist sehr wichtig und liefert Informationen über die aktuelle Schadstoffsituation und Daten zur Validierung entsprechender Luftqualitätsmodelle. Flughäfen sind allerdings Hochsicherheitsbereiche mit sehr beschränkten Zugangsmöglichkeiten. Zur erfolgreichen Durchführung des hier beschriebenen Projektes waren die Emissionsmessungen an Flugzeugen unter realistischen Bedingungen und nahe an der Emissionsquelle unabdingbar. Nur durch die sehr guten Beziehungen unseres Projektpartners, der Nationalen Luftfahrt Universität (NAU) in Kiew, Ukraine, zum Betreiber des Internationalen Flughafens Boryspol wurden die Emissionsmessungen in unmittelbarer Nähe der Flugzeuge überhaupt möglich.

Für die Messungen am Flughafen Boryspol konnten wir auf langjährige Erfahrung bei der Untersuchung von Flugzeugemissionen im Rahmen verschiedener EU-Verbundprojekte zurückgreifen. Besonders zu erwähnen ist hier das von der Europäischen Kommission geförderte Exzellenznetzwerk ECATS. Mit mehreren ECATS-Partnern hatten wir bereits erfolgreich ähnliche Untersuchungen am Internationalen Flughafen von Athen abgeschlossen.

Im September 2012 wurde im Rahmen des Projekts am Internationalen Flughafen Boryspol in Kiew eine Messkampagne durchgeführt, die vom Internationalen Büro des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) finanziell unterstützt wurde. Da

sowohl die NAU als auch der Flughafen nicht über die notwendigen Messgeräte verfügten, wurde an der Bergischen Universität ein Messcontainer (Station A) und ein Messfahrzeug (Station B) mit den notwendigen Messgeräten ausgerüstet, zur zeitweiligen Einfuhr in die Ukraine in Deutschland verzollt (CARNET A.T.A.) und dann von uns über den 2000 Kilometer langen Landweg nach Kiew transportiert. Abbildung 2 zeigt das Messfahrzeug (Station B) sowie die installierten Messgeräte zusammen mit den ukrainischen Wissenschaftlern am Flughafen in Kiew.

Da die Forscher mit ihrem Messfahrzeug in relativer Nähe zur Start- und Landebahn positioniert waren, gelang es, die Emission von Stickoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) und Kohlendioxid (CO_2) verschiedener Passagierflugzeuge während des Starts (Take-off) und während des Rollens auf dem Flugfeld (Ground-Taxi) zu erfassen. Diese beiden Betriebszustände der Flugzeugturbinen unterschieden sich gravierend im Schub (Take-off bis zu



Abb. 2: Messfahrzeug der Bergischen Universität mit den ukrainischen Kollegen der Nationalen Luftfahrt Universität in Kiew, Dr. Kateryna Synylo und Prof. Oleksander Zaporozhets, am Flughafen in Kiew.

100 % Schub, Ground-Taxi 7 % Schub) der Triebwerke und dadurch auch deutlich in ihren Emissionen.

Das Messfahrzeug wurde u. a. mit jeweils zwei NO_x-, CO₂- und Ozon (O₃)-Messgeräten ausgestattet, um zur Beschreibung der Abgasfahne der Flugzeuge auch Gradientenmessungen in 3,6 und 5,7 Meter Höhe über dem Boden durchzuführen. Die Bestimmung von Gradienten bzw. horizontalen und vertikalen Konzentrationsprofilen in der Abgasfahne der Flugzeuge ist wichtig für die Validierung des sogenannten „Jet“-Bereichs des PolEmiCa-CFD-Modells der ukrainischen Partner. Im Messcontainer wurde je ein NO_x-, CO₂- und O₃-Messgerät installiert. Die Probenahme erfolgte in drei Meter Höhe über dem Boden. Meteorologische Daten wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur und relative Luftfeuchte wurden online mit Hilfe von zwei Wetterstationen erfasst.

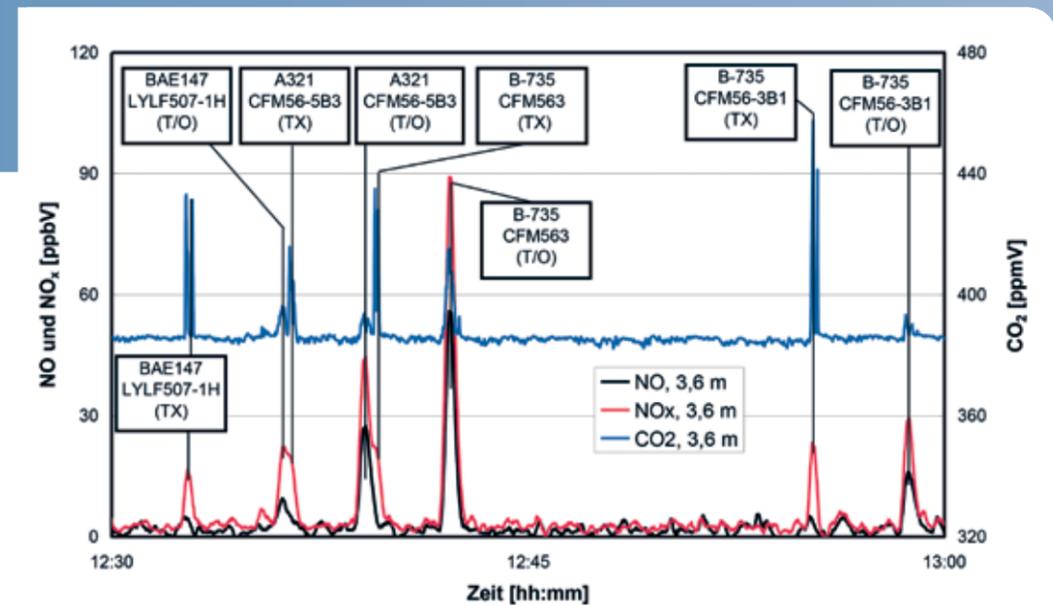
In Abbildung 3 ist der Standort des stationären Messcontainers (*Stationary station A*) und der des Messfahrzeugs (*Van-station B*) am Flughafen Boryspol dargestellt. Die stationäre Messstation A wurde in unmittelbarer Nähe zur Startbahn 18L-36R im Abstand von nur 80 Metern installiert und lag auf der gegenüberliegenden Seite zum *Taxiway A2*. Die Probenahme selbst erfolgte mit Hilfe eines separaten Mastes im Abstand von 60 Metern zur Startbahn in einer Höhe von drei Metern. Die mobile Messstation B wurde aufgrund der vorherrschenden Süd-Ost-Windrichtung (130–170°) am Ende der Zufahrt zur Startbahn 18L-36R im Abstand von 120 Metern zur Startbahn installiert.

Durch die Wahl der Position der mobilen Messstation B konnten die Flugzeugemissionen von NO_x und CO₂ während des Starts (Take-off, T/O) und erstmals auch



Abb. 3: Messstandorte des Messcontainers A und des Messfahrzeugs B am Flughafen Boryspol in Kiew.

Abb. 4: Konzentrations-Zeitprofil des Hintergrunds und der Abgasfahnen von NO, NO_x und CO₂ an der mobilen Messstation B auf einer Höhe von 3,6 Metern für vier verschiedene Flugzeugtypen. TX: Taxi; T/O: Take-off.



unter Taxi (TX)-Bedingungen erfasst werden. Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Konzentrations-Zeitprofil des Hintergrundes und der Abgasfahne von NO, NO_x und CO₂ an der mobilen Messstation B auf einer Messhöhe von 3,6 Metern für vier verschiedene Flugzeugtypen unter TX- und T/O-Bedingungen.

Man erkennt in der Abbildung, dass z. B. beim Flugzeugtyp Boeing B735 (B 737-500) mit zwei Triebwerken des Typs CFM56-3B1 unter TX als auch T/O in der Abgasfahne die CO₂-Emissionspeaks beider Triebwerke aufgelöst werden. Dieser horizontale Konzentrationsgradient in der Abgasfahne weist darauf hin, dass die Emissionen der beiden Triebwerke noch nicht vollständig gemischt sind und daher getrennt erfasst werden.

Des Weiteren wurde in der Abgasfahne ein vertikaler negativer Konzentrationsgradient beobachtet, d.h. die Konzentration in 5,7 Meter Höhe war deutlich kleiner als die in 3,7 Meter Höhe. Weiter erkennt man, dass für TX die CO₂-Konzentration bei nahezu gleicher NO_x-Konzentration wesentlich größer ist als bei T/O. Dies spricht für eine deutlich niedrigere NO_x-Emission der

Triebwerke unter TX, also beim Rollen auf dem Flughafen. Mit Hilfe der erhaltenen Konzentrations-Zeitprofile wurden dann in Zusammenarbeit mit der NAU die NO_x-Emissionsindizes E_{NO_x}, d.h. die Masse an emittierten NO_x pro Kilogramm verbranntem Treibstoff, für TX und T/O der einzelnen Flugzeuge bzw. Flugzeugtriebwerke berechnet.

Unter der Annahme, dass der Anstieg der NO-, NO₂- und CO₂-Konzentration ($\Delta\text{NO}_x/\Delta\text{CO}_2$) in der Abgasfahne proportional zur Emissionsstärke des Flugzeugtriebwerks ist, lässt sich ein Emissionsverhältnis EV zu CO₂ mit $\Delta\text{NO}_x/\Delta\text{CO}_2$ berechnen. Mit Hilfe des Emissionsindex EI_{CO₂} von 3.150 Gramm CO₂ pro Kilogramm verbranntem Treibstoff (Kerosin Jet-A1) wurden die Emissionsverhältnisse EV entsprechend in die Emissionsindizes EI_{NO_x} für die untersuchten Flugzeugtriebwerke umgerechnet. Aus diesen Daten wurden dann Emissionsfaktoren bestimmt und als Eingabegrößen für Modellrechnungen verwendet.

Wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, konnten für einige Flugzeuge, wie z. B. Boeing B737 (UR DNM; 13:30 Uhr),

Zeit	Flugzeugtyp	Flugzeugkennung	Triebwerk	Betriebsbedingung	EI NO _x (ICAO) [g/kg]	Messhöhe [m]	EI (NO _x) [g/kg]
12:32	BAE147	SX-DIZ	LY LF507-1H	TX	3,28	5,7	0,94
12:32	BAE147	SX-DIZ	LY LF507-1H	TX	3,28	3,7	0,92
12:36	BAE147	SX-DIZ	LY LF507-1H	T/O	14,52	3,7	12,10
12:36	BAE147	SX-DIZ	LY LF507-1H	T/O	14,52	3,7	8,14
12:36	A321	TS-IQB	CFMI CFM56-5B3/P	TX	4,0	5,7	11,04
12:36	A321	TS-IQB	CFMI CFM56-5B3/P	TX	4,0	3,7	3,27
12:39	A321	TS-IQB	CFMI CFM56-5B3/P	T/O	18,55	5,7	10,84
12:39	A321	TS-IQB	CFMI CFM56-5B3/P	T/O	18,55	3,7	19,73
12:39	735	UR-GAT	CFM-563C1	TX	3,8	5,7	1,85
12:39	735	UR-GAT	CFM-563C1	TX	3,8	3,7	1,65
12:42	735	UR-GAT	CFM-563C1	T/O	16,6	up	17,60
12:42	735	UR-GAT	CFM-563C1	T/O	16,6	3,7	11,57
12:55	735	UR-AAM	CFM56-3B1	TX	3,9	5,7	2,83
12:55	735	UR-AAM	CFM56-3B1	TX	3,9	3,7	2,34
12:58	735	UR-AAM	CFM56-3B1	T/O	19,4	5,7	16,06
12:58	735	UR-AAM	CFM56-3B1	T/O	19,4	3,7	12,29

Tab. 1: Emissionsindizes E_{NO_x} vom 13.09.2012 für TX und T/O im Vergleich zur ICAO Datenbank.

für die einzelnen Triebwerke (Peak 1 und 2) getrennt die EI_{NO_x} für TX bestimmt werden. Die Überprüfung der EI_{NO_x} für TX und T/O ergab innerhalb der Messunsicherheit von ± 15% eine gute Übereinstimmung mit der ICAO-Datenbank. Auftretende Abweichungen beruhen vermutlich zum Teil darauf, dass die normierten Betriebsbedingungen der Triebwerke für TX und T/O beim ICAO*-Test von den realen Betriebsbedingungen am Flughafen abweichen. So ist z. B. T/O beim ICAO-Test mit 100% Schub definiert. Unter realen Bedingungen erfolgt der Start mit maximalem Schub aber nur bei maximalem Startgewicht. Da die EI_{NO_x} wichtige Eingangsparameter für das PolEmiCa-Modell sind, wurden zur Validierung des Modells nur die real gemessenen EI_{NO_x} verwendet.

Mit Hilfe der aus den Messungen abgeleiteten Eingangsparameter wurden Konzentrations-Zeitprofile für den Flughafen in Kiew modelliert. In Tabelle 2 sind die modellierten und gemessenen NO_x-Konzentrationen in der Abgasfahne für vier Flugzeuge exemplarisch dargestellt. Man erkennt für drei Flugzeuge bzw. die Triebwerkstypen LY LF7507-1H, CFM56-3C1 und CFM-3B1 eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und mit Hilfe des PolEmiCa/CFD-Modells berechneten NO_x-Konzentrationen. Der Vergleich mit den Werten, die mit Hilfe des PolEmiCa-Modells berechnet wurden, ist wesentlich schlechter. Grund dafür ist, dass beim PolEmiCa/CFD-Modell erstmals auch der bereits angesprochene „Jet“-Bereich der Abgasfah-

* ICAO ist die Internationale Zivilluftfahrtorganisation, eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen.



Abb. 5: Take-off am Flughafen Boryspol.

Tab. 2: Modellerte und gemessene NO_x-Konzentrationen in der Abgasfahne von vier Flugzeugen am Flughafen Boryspol.

Flugzeugtyp	Triebwerk	C _{NO_x} [µg/m ³] PolEmiCa	C _{NO_x} [µg/m ³] PolEmiCa CFD	C _{NO_x} [µg/m ³] gemessen Höhe: 3,7 m	C _{NO_x} [µg/m ³] gemessen Höhe: 5,7 m
BAE147	LY LF507-1H	49	31	22±3	34±5
A321	CFM56-5B3/P	184	91	44±7	52±8
B735	CFM56-3C1	35	80	78±12	75±11
B735	CFM56-3B1	34	31	28±4	21±3

ne mit Hilfe der Messungen angepasst werden konnte. Beim originären PolEmiCa-Modell erfolgt diese Anpassung nicht.

Nach einer abschließenden Auswertung soll das gesamte Modell von der NAU zur Modellierung der Abgasfahnen bzw. Emissionssituation am Flughafen Boryspol in Kiew eingesetzt werden.

Aufgrund des intensiven und erfolgreichen Erfahrungsaustausches zwischen den beteiligten Institutionen ist geplant, dass künftig der Flughafenbetreiber in Kooperation mit der NAU selbstständig Emissionsmessungen im Nahbereich des Flughafens durchführen wird, um die Luftqualität im Bereich des Flughafens zu überwachen.

Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse sind an der Bergischen Universität Wuppertal und National Aviation University bereits in die Ausbildung der Studierenden eingeflossen. So wurden zum Beispiel im Chemie-Masterstudiengang an der Bergischen Universität im Wahlpflichtbereich „Molekulare Umweltchemie“ die Ergebnisse der Messkampagnen und Modellierungen in den Schwerpunkt „Atmosphärische Chemie“ eingebunden.

Wir hoffen, dass wir die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den ukrainischen Kolleginnen und Kollegen trotz der schwierigen politischen Verhältnisse in der Ukraine auch zukünftig fortführen können.

Modellierung und Simulation elektromagnetischer Felder



von / by
Prof. Dr. Markus Clemens
clemens@uni-wuppertal.de

Mit den seit etwa 150 Jahren existierenden mathematischen Gleichungen von James Clerk Maxwell [1] werden makroskopische Phänomene des Elektromagnetismus in den Naturwissenschaften bzw. der Elektrotechnik vollständig beschrieben. Die darauf basierende Modellierung und rechnergestützte Simulation elektromagnetischer Felder (engl. *Computational Electromagnetics*) bildet den Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls für Theoretische Elektrotechnik an der Bergischen Universität Wuppertal.

Unsere technische Umwelt ist heute geprägt durch den Einsatz elektromagnetischer Felder, wie etwa bei der Übertragung von Energie und Information. Das ist umso bemerkenswerter, da elektromagnetische Felder für Menschen zumeist unsichtbar und nicht unmittelbar körperlich erfahrbar sind. (Ausnahmen bilden z.B. das sichtbare Licht und infrarote Wärmestrahlung). Die technische Entwicklung bis zum Heute ist dadurch nachvollziehbar, dass die Beschreibung elektromagnetischer Feldphänomene auf der Basis der Maxwell'schen Feldgleichungen theoretisch sehr gut verstanden ist. Die Lösungen dieses Systems von vier linearen partiellen Differentialgleichungen erlauben es, z.B. elektrische Felder in Bauteilen der Hochspannungstechnik, magnetische Felder in Elektromotoren oder elektromagnetische Feldverteilungen von Antennen vollständig zu beschreiben. Die hierfür benötigten modellierungsmathematischen Annahmen zu den Problemgeometrien, zu den Materialbeziehungen oder Randbedingungen und letztlich auch die geeignete Auswahl verfügbarer mathematischer Lösungsmethoden sind abhängig von der technischen Anwendung des Feldproblems.

Der problemgerechte Einsatz dieser Modellierungsannahmen und die Weiterentwicklung der mathematischen Lösungsmethoden für die quantitative Beschreibung elektromagnetischer Felder in der elektrotechnischen Ingenieurwissenschaft sowie den Naturwissenschaften bilden den Kern des Fachs Theoretische Elektrotechnik. Die Weiterentwicklung des ingenieurwissenschaftlichen „Werkzeugkastens“ zur Lösung der Maxwellgleichungen und damit dessen Anwendbarkeit bei der ingenieurtechnischen Auslegung und Funktionsoptimierung elektrotechnischer Systeme ist gekoppelt an die Fortschritte der Angewandten Mathematik. Mit neuen Methoden

zur Lösung partieller Differentialgleichungen konnten immer komplexere elektrische, magnetische bzw. elektromagnetische Feldverteilungen beschrieben werden. Seit über fünfzig Jahren gehört hierzu der Einsatz rechnergestützter Methoden. Anstelle von den zuvor in über hundert Jahren entwickelten kontinuumstheoretischen Methoden der Angewandten (Ingenieur-)Mathematik beginnen numerische Lösungsmethoden der Feldtheorie üblicherweise mit einer „Diskretisierung“ des Problems. Vorab wird die unendliche Informationsfülle in einer kontinuierlich im Raum verteilten elektromagnetischen Feldanordnung hin zu einer in kapazitätsbegrenzten Computerspeichern darstellbaren endlichen Menge an Information eingeschränkt.

So wird in „volumendiskretisierenden Lösungsverfahren“ das elektrische bzw. das magnetische Vektorfeld als im Raum ausgerichtete Größe mit einer bestimmten Intensität an genau definierten räumlichen Orts- sowie Zeitpunkten ausgewertet. Das wohl bekannteste Verfahren dieses Typs stellt die „Finite-Differenzen-Zeitbereichsmethode“ (FDTD) dar, die vor beinahe fünfzig Jahren veröffentlicht wurde [2]. Damit konnten bereits früh und speichereffizient elektromagnetische Feldpropagationsphänomene, z. B. von elektromagnetischen Hochfrequenzantennen, simuliert werden. In ihren Grundzügen stellt sie noch

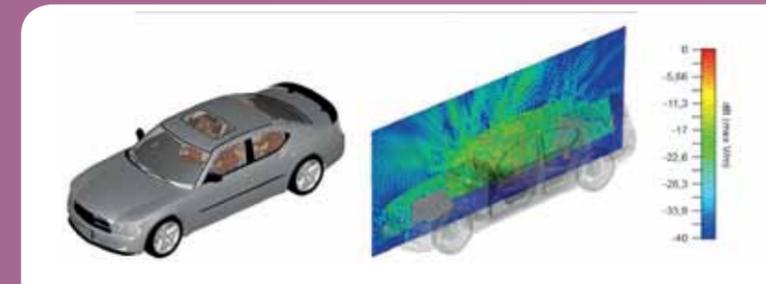


Abb. 1: Elektrisches Feld eines abstrahlenden Mobilfunkgerätes in einem mit vier Menschmodellen besetzten Kraftfahrzeug.
Simulation: C. Cimale

heute die Grundlage vieler kommerzieller elektromagnetischer Feldsimulationswerkzeuge dar.

Mit der sogenannten Finiten Integrationstechnik [3] wurde der in der FDTD-Methode bereits enthaltene Ansatz hin zu einer „diskreten“ elektromagnetischen Feldtheorie ausgebaut [4]. Mit den computertauglich aufbereiteten „Gitter-Maxwellgleichungen“ können nun elektrische, magnetische sowie elektromagnetische Feldverteilungen zu realitätsnahen Problemgeometrien und Materialverteilungen unter Berücksichtigung von physikalisch wichtigen Eigenschaften wie Ladungs- oder Energieerhaltung simuliert werden.

Mit diesen Methoden werden u.a. Fragen der Umweltverträglichkeit elektromagnetischer Feldexposition biologischer Organismen betrachtet. So zeigt Abbildung 1 den Einsatz von vier Gitter-Menschmodellen in einem Automodell, in dem ein Mobilfunkgerät bei 2 GHz abstrahlt. In Abbildung 2 ist ein Mensch modelliert, der auf einem Polizeimotorrad mit einer leistungsstarken TETRA-Funkantenne sitzt [5]. In beiden Fällen ist die spezifische Absorptionsrate, also die pro Massenelement des Körpergewebes aufgenommene elektromagnetische

For the past 150 years or so James Clerk Maxwell's mathematical equations have adequately described the macroscopic phenomena of electromagnetism for natural scientists and electrical engineers. Computational electromagnetics, the modeling and computer-aided simulation of electromagnetic fields, is the research focus of UW's Department of Theoretical Electrical Engineering under the direction of Prof. Dr. rer. nat. M. Clemens.

Leistung als Quelle lokaler Temperaturerhöhungen, die Zielgröße der Simulation. Die räumliche Problemauflösung erfolgt mit etwa 1,5 Milliarden Gitterzellen (Auto) bzw. 280 Millionen Gitterzellen (Motorrad). Für derartige räumliche Auflösungen wird ein Spezialrechner mit ca. 1,2 Terabyte RAM und vierzig nVidia K20 Beschleunigerkarten auf der Basis von Graphikprozessoren (GPUs) verwendet, der seit 2013 als DFG-Forschungs Großgerät – beantragt über das Interdisziplinäre Zentrum für Angewandte Informatik und Scientific Computing (IZ II) – an der Bergischen Universität zur Verfügung steht.

Zu den volumendiskretisierenden Verfahrensklassen gehören auch die Finite-Elemente-Methoden, auf deren Basis z.B. Methoden für die schnelle Berechnung zeitlich veränderlicher Magnetfelder mit Grafikkartenprozessoren¹ oder für die Auslegung und Optimierung von Komponenten, wie Isolatoren und Schaltanlagen der elektrischen Hochspannungstechnik mit neuartigen nichtlinearen Feldsteuerungsmaterialien [6] (Abb. 3), entwickelt werden. Daneben gibt es viele rechnergestützte Verfahren, die auf alternativen Umformulierungen der Maxwellgleichungen basieren, beispielsweise Rand-

Abb. 2: Modell eines Polizeimotorrads mit Tetra-Funkanlage
Simulation: M. Zang, [5]



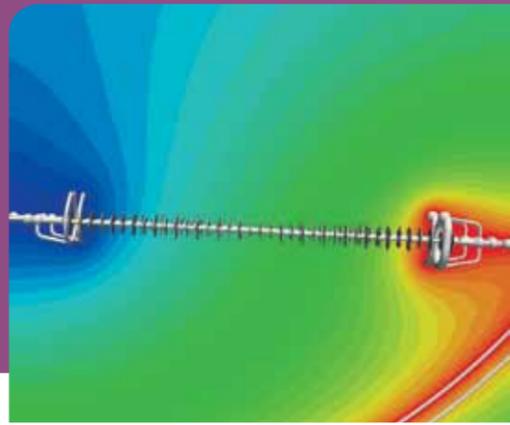


Abb. 3: Feldverteilung eines Rodurflex-Longstabilisatormodells (Lapp Insulators GmbH).
Simulation: H. Ye

integralgleichungsmethoden für elektromagnetische Streuprobleme an Metallobjekten oder spezielle Modelle zur Simulation von dünnen, aber sehr langen Kabelsträngen in Kraftfahrzeugen, Flugzeugen oder Gebäuden.

Die Kopplung derart verschiedener Feldsimulationsverfahren mit unterschiedlichem Auflösungsvermögen erlaubt es technische Probleme zu berechnen, die Multiskalen- bzw. Multi-Domänen-Charakter haben, d.h. in denen Objekte mit stark unterschiedlichen geometrischen Abmessungen oder aber mit ganz verschiedenen Modellierungsansätzen zu betrachten sind. Dieser Co-Simulationsansatz wird z.B. am Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik für das FP7 Projekt STRUCTURES² genutzt zur Berechnung von elektromagnetischen Einkoppelpfaden in Gebäude und technische Systeme, die als kritische Infrastruktur im Hinblick auf elektromagnetische Angriffe gewertet werden (Steuerleitzentralen, Banken, Flughafengebäude, usf.).

Die Reife der Verfahren ermöglicht zudem vermehrt multiphysikalische Simulationen; so können beispielsweise elektromagnetische Felder, gekoppelt mit Temperaturverteilungen, berechnet werden.

Die Genauigkeit dieser elektromagnetischen Feldsimulationen wächst mit steigender Leistungsfähigkeit von Computern in Rechen- und Speicherkapazitäten, aber auch mit den Fortschritten in der Methodenentwicklung der Numerischen Mathematik und der Informatik. So werden am Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik neueste mathematische Erkenntnisse zu Verfahren der Modellordnungsreduktion³ bzw. zur Behandlung von stochastisch auftretenden Toleranzen durch sogenannte Uncertainty-Quantification-Methoden [7], sowie auch Verfahren zur Nutzung aktueller Hochleistungsrechnerarchitekturen bei der Lösung der

algebraischen Gleichungssysteme [8] numerischer Feldberechnungsmethoden weiterentwickelt.

Computational Electromagnetics – die rechnergestützte elektromagnetische Feldberechnung ist damit ein sehr interdisziplinäres Forschungsfeld, in dem Fragestellungen zum virtuellen Prototypentwurf, zur rechnergestützten Funktionsoptimierung und zum Nachweis der elektromagnetischen (Umwelt-)Verträglichkeit von Systemen vorwiegend der Ingenieurwissenschaft Elektrotechnik durch Adaption und Weiterentwicklung von Methoden der Angewandten Mathematik und der Computerwissenschaften gelöst werden können.

www.tet.uni-wuppertal.de

¹DFG-Projekt CL143-11/1 „Parallele und explizite Verfahren für die Simulation von Wirbelstromproblemen“

²EU-FP7-Projekt „STRUCTURES – Strategies for the Improvement of Critical Infrastructure Resilience to Electromagnetic Attacks“, (Grant agreement no: 285257)

³DFG-Projekt CL143-10/1 „Modellordnungsreduktionstechniken für elektroquasistatische Simulationsverfahren in der elektrischen Energieübertragungstechnik“

Literaturhinweise

[1] J.C. Maxwell, „A dynamical theory of the electromagnetic field“, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 155, 1865.
 [2] K. Yee, „Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media“, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, 1966.
 [3] T. Weiland, „Time Domain Electromagnetic Field Computation with Finite Difference Methods“, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, vol. 9, 1996.
 [4] M. Clemens, T. Weiland, „Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique: Formulations and Numerical Algorithms“, Progress in Electromagnetic Research (PIER) Monograph Series, PIER 32, 2001.
 [5] M. Ludwig, N. Hopfer, „Modellierung und numerische Simulation von Szenarien zur Bestimmung der Personen-Exposition durch elektromagnetische Felder der im digitalen Motorradfunk der Polizei verwendeten TETRA-Endgeräte“, Supplement, BU Wuppertal, 2014.
 [6] H. Ye, M. Clemens, J. Seifert, „Electro-Quasistatic Field Simulation for the Layout Optimization of Outdoor Insulation Using Microvaristor Material“, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 5, 2013.
 [7] D. Schmidhäusler, S. Schöps, M. Clemens, „Linear Subspace Reduction for Quasistatic Field Simulations“, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, 2014.
 [8] C. Richter, S. Schöps, M. Clemens, „GPU Acceleration of Algebraic Multigrid Preconditioners for Discrete Elliptic Field Problems“, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, 2014.

Optimierung von Knautschzonen

Optimizing crumple zones

Um Unfallfolgen zu mildern, werden in Fahrzeugen und Flugzeugen „Crashstrukturen“ ausgelegt, die als sogenannte Knautschzonen wirken. Die Auslegung erfolgt mithilfe von Computersimulationen, die extrem aufwendig sind. Durch strengere gesetzliche Anforderungen, wachsende Kundenwünsche und den Einsatz neuer Materialkombinationen wird der Bedarf an Crashesimulationen weiter steigen. Im Rahmen eines bundesweiten Forschungsprojektes sollen nun innovative Softwaretools entwickelt werden, die die virtuelle Strukturoptimierung von Fahrzeugkarosserien nachhaltig verbessern und im industriellen Alltag wirtschaftlicher und praktikabel machen. Das Projektvorhaben wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und vom Automotive Simulation Center Stuttgart koordiniert.

„Bislang beruht die virtuelle Craschauslegung auf sehr detaillierten und rechenzeitintensiven Modellen. Auch in Zukunft werden diese Simulationsmodelle immer weiter verfeinert und damit rechenzeitintensiver“, erklärt Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher, Experte für die Optimierung mechanischer Strukturen an der Bergischen Universität. Durch die Verwendung von physikalischen und mathematischen Ersatzmodellen sollen die Antwortzeiten in der Strukturoptimierung nun reduziert werden, um damit die Anwendung von Optimierungsverfahren im Fahrzeugentwicklungsprozess zu ermöglichen. In dem Projektvorhaben „eEgO – Entwicklung von Softwaremethoden zur effizienten Ersatzmodell gestützten Optimierung für die Craschauslegung im Fahrzeugentwicklungsprozess“ werden dafür neue Verfahren und Softwaretools entwickelt.

Projektpartner sind das Automotive Simulation Center Stuttgart, die Technische Universität München und die Bergische Universität Wuppertal sowie die Softwareunternehmen divis intelligent solutions, DYNAMore und GNS – Gesellschaft für Numerische Simulation mbH. Als Berater und Inputgeber begleiten das Projekt die Unternehmen Opel, Audi, Benteler Automobiltechnik, BMW, Dassault Systèmes, Daimler, Porsche, Bosch und Volkswagen Osnabrück.

In order to minimize the effect of accidents, road vehicles and airplanes contain built-in crash structures in the form of crumple zones. The zones are calculated with the help of highly complex computer simulations. Increasingly rigorous legislation, growing customer demands, and new material combinations are driving the deployment of these simulation methods to new heights. A nationwide research project is currently developing innovative software that will enhance the structural optimization of road vehicle bodywork at the virtual level and make it economically and technically more practicable in everyday industrial production. The project is funded by the Federal Ministry of Education and Research and coordinated by the Automotive Simulation Center in Stuttgart.

UW's Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher, a specialist in the optimization of mechanical structures, observes that “up to now virtual crash testing has been based on very detailed and time-consuming calculation models, and the ongoing refinement of these models will make them even more time-consuming.” The use of physical and mathematical surrogates aims to reduce this time scale, thereby facilitating the application of optimization procedures in the automotive development process. The eEgO project – full title: “Development of Software Methods for the Efficient Optimization of Crash Test Interpretation Based on Surrogate Modeling in the Automotive Development Process” – is developing new procedures and software tools for this purpose.

Project partners are the Automotive Simulation Center Stuttgart, the Technical University of Munich, and the University of Wuppertal, together with the software enterprises divis intelligent solutions, DYNAMore, and GNS Numerical Simulation. Advice and input is also coming from Opel, Audi, Benteler Automotive, BMW, Dassault Systèmes, Daimler, Porsche, Bosch, and Volkswagen Osnabrück.

www.oms.uni-wuppertal.de





1. Deutscher Fußverkehrskongress

First German Pedestrian Traffic Congress

Mit 300 Teilnehmerinnen und Teilnehmer war der 1. Deutsche Fußverkehrskongress in Wuppertal ein voller Erfolg. Organisiert wurde er vom Fachgebiet Straßenverkehrsplanung und -technik unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gerlach. „Mit der Tagung wollten wir den Stellenwert des Fußverkehrs in der mobilen Gesellschaft herausstellen und Lösungen diskutieren, die ein gutes, qualitativvolles, barrierefreies, sicheres und unkritisches Zufußgehen bei allen Gelegenheiten ermöglichen“, so Prof. Gerlach.

Jährlich verunglücken rund 30.000 Fußgängerinnen und Fußgänger auf deutschen Straßen – aus Sicht der Experten eine nicht tragbare Situation. „Diese Zahlen lassen sich vor allem darauf zurückführen, dass der Fußverkehr in der Vergangenheit stiefmütterlich behandelt wurde“, sagt Prof. Gerlach.

Der Deutsche Verkehrssicherheitsrat (DVR), die Unfallforscher der Versicherer (UDV), das Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen sowie die Bergische Universität hatten Entscheider aus der Verkehrspolitik, Planer aus der Raum- und Stadtplanung, Architekten und Ingenieure zum Austausch nach Wuppertal eingeladen.

Organized by UW's Institute of Road Traffic Planning and Engineering under the direction of Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gerlach, the First German Pedestrian Traffic Congress in Wuppertal was, with 300 participants, a thorough success. „The conference“, Prof. Gerlach explains, „aimed to highlight the place of pedestrian traffic in the mobile society, and to discuss ways of ensuring safe, high-quality, barrier-free pedestrian movement in all situations.“

30,000 pedestrian accidents per year in Germany represent, experts agree, an intolerable situation. „These figures“, Prof. Gerlach observes, „show above all how pedestrians have been neglected in the past.“

Hosted by the German Road Safety Council (DVR), German Insurers' Accident Research (UDV), the State of North Rhine-Westphalia's Ministry of Construction, Housing Urban Development and Transport, and the University of Wuppertal, the conference was attended by decision makers from the areas of traffic and transportation politics, as well as urban and spatial planners, architects, and engineers.

AkuCheck – Raumakustik messen und besser verstehen

Acoustic check – improving the measurement and understanding of spatial acoustics

Mit einer neuen Software können akustische Eigenschaften bestehender Räume gemessen und bewertet werden. Das Ergebnis eines Forschungsprojektes des Faches Architektur kann über die Homepage des Lehr- und Forschungsgebiets Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung von Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss angefordert werden.

In vielen Gebäudetypen ist eine überzeugende Raumakustik wesentlicher Bestandteil der Nutzungsqualität. Dies gilt in besonderem Maß in Bildungseinrichtungen, aber auch für alle anderen Räume, in denen kommuniziert wird. Darunter gibt es jedoch zahlreiche Räume, die aufgrund ihrer raumakustischen Eigenschaften für ihren Zweck nicht gut geeignet sind oder erst nachträglich verbessert wurden. Unter Leitung von Dr. Detlef Hennings, Lehrbeauftragter an der Bergischen Universität, wurde ein einfach zu handhabendes und didaktisch aufbereitetes EDV-Werkzeug zur messtechnischen Bewertung von Räumen mit dem eigenen Notebook-PC entwickelt. Einsetzbar im Studium und in der Weiterbildung von Architekten sowie anderen Baubeteiligten.

Die Entwicklungsarbeiten wurden durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Rahmen des Programms „Zukunft Bau“ gefördert und von den Firmen Akustik & Raum, Caparol, Ligno Trend und OWAacoustic unterstützt.

New software enables the acoustics of existing rooms to be accurately measured and evaluated. The results of a research project at UW's School of Architecture can currently be viewed on the homepage of the Department of Constructional Physics and Technical Building Services, directed by Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss.

Spatial acoustics are in many types of building an essential aspect of user quality. This is especially the case in educational institutions, but is equally true of all rooms and spaces in which people communicate. Many of these are unsuitable for their purpose, or require subsequent acoustic improvement. Under the leadership of Dr. Detlef Hennings, a temporary lecturer at UW, a simple, didactically structured EDP tool has been developed, by means of which room acoustics can be evaluated with the help of an ordinary notebook PC. The tool can be used immediately in the training and continuing education of architects, as well as that of students and practitioners of other constructional disciplines.

Development of the tool was funded by the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development within the framework of the „Future of Building“ project. The project was supported by the companies Akustik & Raum (Spatial Acoustics), Caparol, Ligno Trend, and OWAacoustic.

www.btga-arch.uni-wuppertal.de/werkzeuge/akucheck.html

EmoTal – Elektromobilität Wuppertal

EmoTal – Electro-mobility in Wuppertal

Das neue Verbundprojekt „EmoTal – Nutzerzentrierte Elektromobilität Wuppertal“ konzentriert sich – ganz im Sinne des wachsenden Energie- und Umweltbewusstseins – auf die Gestaltung anwenderfreundlicher Dienstleistungsinnovationen im Bereich Elektromobilität. Dr. Sigmund Schimanski von der Forschungsgruppe Human Factors Engineering (HFE) im Fachbereich Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal leitet das Projekt. Die Stadt Wuppertal ist als Kooperationspartner beteiligt.

EmoTal entwickelt auf der Basis der aktuellen Nutzungsrealität neue Dienstleistungen im Bereich Elektromobilität. Das von Dr. Sigmund Schimanski entwickelte Nutzungsmodell ist Grundlage für die anwenderzentrierte Konzeptionierung und Umsetzung der innovativen Dienstleistungen. „Ziel des Projekts ist die Steigerung der Attraktivität und somit auch der Verbreitung von elektrischen Autos und Rädern“, so Schimanski.

EmoTal will „Elektromobilisten“ zu regelmäßigen Befragungen motivieren, die für die Entwicklung neuer Dienstleistungen (E-Fitnessbike, E-Schulungen/Zertifizierungen, dynamische E-Versicherungen) benötigt werden. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse der Befragungen Herstellern und Kommunen für den Ausbau der Elektromobilität zur Verfügung gestellt. Im Bereich der Elektromobile liegen die Schwerpunkte des mit insgesamt 2,1 Mio. geförderten Projekts auf der Entwicklung passgenauer und übergreifender Dienstleistungen in Form von Schulungen und Zertifizierungen für Reparatur- und Rettungsmaßnahmen sowie von dynamischen Versicherungsmodellen. Für eine Analyse der Anwendungsrealität greift das Verbundprojekt auf die natürlich gewachsene Anzahl von privaten Elektromobilen im Bergischen Land zurück. Die Stadt Wuppertal fördert seit Jahren die Nutzung von Pedelecs und Elektro-Pkws.

Die Forschungsgruppe HFE der Bergischen Universität Wuppertal koordiniert das zunächst auf zwei Jahre angesetzte Verbundprojekt. Kooperationspartner sind – neben der Stadt Wuppertal – das Arbeitsgebiet Elektromobilität der Bergischen Universität unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling, die RWTH Aachen, der TÜV NORD Bildung und das Maklerhaus Schmitz Horn Treber.

Das Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

In line with current concerns about energy and ecology, the new network project „EmoTal – User-Centered Electro-Mobility in Wuppertal“ focuses on the design of innovative user-friendly services in the field of electro-mobility. In the words of project leader Dr. Sigmund Schimanski of the Human Factors Engineering (HFE) research group at UW's School of Electrical Engineering, the project aims to „enhance the attractiveness and diffusion of electrically driven automobiles and bicycles.“

Based on the growing popularity of private electric vehicles in the Wuppertal region, EmoTal seeks to boost the growth of new electro-mobility services, ranging from e-fitness bicycles, through e-training and certification for repairs and rescue measures, to dynamic e-insurance. It engages electro-mobile citizens in regular surveys, whose results will also be made available to manufacturers and municipalities.

Coordinated by UW's HFE research group, the project will initially run for two years. Cooperation partners are the City of Wuppertal – which has for some years promoted the use of electric bicycles and cars – UW's Department of Electro-Mobility (led by Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling), RWTH Aachen University, Technical Inspection Services Educational (North) (TÜV NORD), and Schmitz Horn Treber Real Estate.

The project is funded by the Federal Ministry of Education and Research with a total of € 2.1 million.

www.emotal.de



Literaturwissenschaftler Prof. Rüdiger Zymner in Academia Europaea berufen

Literary scholar Prof. Rüdiger Zymner elected to Academia Europaea

Prof. Dr. Rüdiger Zymner, Literaturwissenschaftler an der Bergischen Universität, ist in die Europäische Akademie der Wissenschaften, „Academia Europaea“, Sektion: „Literary and theatrical studies“, gewählt worden. Die Academia Europaea ist die größte europäische Akademie der Wissenschaften. Ihr gehören über 2800 führende Experten aus allen Wissenschaftsbereichen an – darunter auch zahlreiche Nobelpreisträger. Die Mitgliedschaft in der Academia Europaea wird durch Einladung und nach Vorschlag einer Gutachterkommission erworben. Auswahlkriterien sind die dominierende Stellung in einer Wissenschaftsdisziplin, herausragende wissenschaftliche Leistungen und hohe Interdisziplinarität.

UW's Prof. Dr. Rüdiger Zymner, has been elected to the literary and theatrical studies section of the Academia Europaea. With more than 2800 leading specialists from the entire spectrum of the arts and sciences, including numerous Nobel prizewinners, the Academia Europaea is the largest European Academy of Sciences. Membership is by invitation on the basis of recommendation by a selection committee whose criteria include the ranking of the candidate in the discipline in question and the level of interdisciplinarity in his or her work.

www.ae-info.org
www.avl.uni-wuppertal.de

Internationale Konferenz „Farbe als Experiment“ war voller Erfolg

International conference on “Color as Experiment” a complete success

Ein internationales und interdisziplinäres Teilnehmerfeld von mehr als 600 Personen war zu Gast bei der zweitägigen Konferenz „Farbe als Experiment – Forschende Strategien in Handwerk, Design, Kunst und Wissenschaft“ an der Bergischen Universität. „Wir haben uns sehr über die starke Resonanz gefreut, mit der unsere Einladung angenommen wurde“, so die Organisatoren Prof. Dr. Axel Buether (Didaktik der visuellen Kommunikation) und Prof. Dr. Johannes Grebe-Ellis (Physikdidaktik), beide vom Vorstand des Deutschen Farbenzentrums.

An international group of more than 600 specialists attended the two-day conference at UW on “Color as Experiment – Research Strategies in Trades, Design, Art and Science.” Conference organizers Prof. Dr. Axel Buether (Didactics of Visual Communication) and Prof. Dr. Johannes Grebe-Ellis (Didactics of Physics), both of them board members of the German Color Center, expressed their pleasure at the “powerful resonance that met our invitation.”

As well as lectures, workshops, and an exhibition, the program offered delegates the opportunity to experiment in UW's physics-didactics lab and materials workshop. Commenting on the conference, Prof. Grebe-Ellis sees it as “a unique forum for trans-disciplinary exchange, with plenty of room for active sensory knowing processes.” The conference was a cooperative project of UW's Faculties of Art and Design and Mathematics and Natural Sciences under the aegis of the German Color Center.

Founded in 1962, the German Color Center unites representatives of many professions and disciplines concerned with the applications of color in science, art and design. In 2013 Grebe-Ellis and Buether relocated the Center from Berlin to Wuppertal. “With the conference”, Prof. Buether comments, “the German Color Center has successfully arrived at its new home.”

www.farbe-als-experiment.de

Auf dem Programm standen Vorträge und Workshops sowie eine Ausstellung. Außerdem konnten die Konferenzteilnehmer im physikdidaktischen Labor und der Materialwerkstatt experimentieren. „Die Beiträge bildeten ein einzigartiges Forum für den fachübergreifenden Austausch und viel Raum für aktive sinnliche Erkenntnisprozesse“, so Prof. Grebe-Ellis. Die Konferenz war eine Kooperation der Fachbereiche Design und Kunst sowie Mathematik und Naturwissenschaften unter Leitung des Deutschen Farbenzentrums e.V. (DFZ).

Im 1962 gegründeten DFZ sind Vertreter unterschiedlicher Berufsgruppen zusammengeschlossen, um wissenschaftliche, künstlerische und gestalterische Arbeit im Bereich der Farbe zu fördern. Gemeinsam mit seinem Vorstandskollegen Prof. Grebe-Ellis hat Prof. Buether im vergangenen Jahr den Sitz des Deutschen Farbenzentrums von Berlin nach Wuppertal verlegt. „Mit der Konferenz ist das DFZ erfolgreich an seiner neuen Wirkungsstätte angekommen“, sagt Prof. Buether.



Initiatoren, Freunde und Team des neuen Wuppertaler Instituts für bildungsökonomische Forschung (v.l.n.r.): Dekan Prof. Dr. Michael Fallgatter, Dr. Anna Makles, Prof. Dr. Hendrik Jürges, Festredner Prof. Dr. Ludger Wößmann, Prorektorin Prof. Dr. Cornelia Gräsel, Vorstandsvorsitzende Prof. Dr. Kerstin Schneider, Hochschulratsvorsitzender Dr.h.c. Josef Beutelmann und Dr. Alexandra Schwarz.

Initiators, supporters and team of the new Wuppertal Research Institute for the Economics of Education: (l. to r.) Prof. Dr. Michael Fallgatter (Dean of the Faculty of Economics), Dr. Anna Makles, Prof. Dr. Hendrik Jürges, Prof. Dr. Ludger Wößmann (invited speaker at the opening ceremony), Prof. Dr. Cornelia Gräsel (UW Pro-Rector for International Relations and Diversity), Prof. Dr. Kerstin Schneider (Chairperson of the Board of Governors), Dr. h. c. Josef Beutelmann (Chairperson of UW Supervisory Board), and Dr. Alexandra Schwarz.

Wuppertaler Institut für bildungsökonomische Forschung eröffnet

Wuppertal Research Institute for the Economics of Education opened

Um die bildungsökonomische Forschung an der Bergischen Universität zu stärken, hat die Hochschule das Wuppertaler Institut für bildungsökonomische Forschung (WIB) gegründet. Ziel des WIB ist es, die Zusammenarbeit von Ökonomen und Bildungsforschern zu fördern. Bereits 2013 hat das WIB seine Arbeit aufgenommen, Ende Oktober 2014 wurde es offiziell eröffnet. Zu seinen zentralen Aufgaben zählen nicht nur die interdisziplinäre Forschung zu Bildungsthemen, sondern auch die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und bildungspolitische Beratung.

In order to strengthen research at UW into educational economics, the university has established the Wuppertal Research Institute for the Economics of Education. The institute, which aims to promote cooperation between economists and educational researchers, started work in 2013, but the official opening was only in October 2014. Its mission comprises interdisciplinary educational research, (post-)doctoral academic training, and consulting in the field of educational politics.

Das WIB ist eine fachbereichsübergreifende, wissenschaftliche Einrichtung der Bergischen Universität Wuppertal, getragen von der Schumpeter School of Business and Economics und dem Institut für Bildungsforschung in der School of Education. Förderer und Initiatoren der Idee sind Uni-Rektor Prof. Dr. Lambert T. Koch, Dekan Prof. Dr. Michael Fallgatter und Bildungsökonomin Prof. Dr. Kerstin Schneider von der Schumpeter School sowie Bildungsforscherin Prof. Dr. Cornelia Gräsel von der School of Education. Weitere Gründungsmitglieder sind Gesundheits- und Bildungsökonom Prof. Dr. Hendrik Jürges sowie die Bildungsökonominnen Dr. Anna Makles und Dr. Alexandra Schwarz.

A cross-faculty organ of the University of Wuppertal, the institute is a joint project of the Schumpeter School of Business and Economics and the Institute of Educational Research, which is affiliated to the School of Education. Founding members of the institute are UW Rector Prof. Dr. Lambert T. Koch, Dean of the Faculty of Economics Prof. Dr. Michael Fallgatter and educational economist Prof. Dr. Kerstin Schneider from the Schumpeter School, and Prof. Dr. Cornelia Gräsel from the School of Education, together with Prof. Dr. Hendrik Jürges (health and educational economics) and Dr. Anna Makles and Dr. Alexandra Schwarz (educational economics).

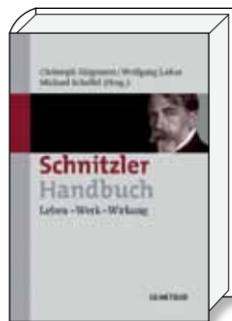
www.wib.uni-wuppertal.de



Georg Eckert / Peter Geiss / Arne Karsten: Die Presse in der Julikrise 1914

Am 28. Juni 1914 wurde der österreichisch-ungarische Thronfolger, Erzherzog Franz Ferdinand, in Sarajevo ermordet. Das Attentat löste die sogenannte Julikrise aus, die schließlich zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs führte. Die Historiker Dr. Georg Eckert (Wuppertal), Prof. Dr. Peter Geiss (früher Wuppertal, jetzt Bonn) und Prof. Dr. Arne Karsten (Wuppertal) haben einen Sammelband veröffentlicht, der in verschiedenen Aufsätzen die internationale Berichterstattung und den Weg in den Ersten Weltkrieg untersucht. „Die Presse war zugleich Indikator und wesentlicher Faktor jener Entwicklungen, aus denen der Große Krieg entstand“, so die Herausgeber. Die Beiträge in dem Sammelband nehmen eine internationale Presseschau vor und analysieren, wie Zeitungen über Julikrise und Kriegsausbruch berichtet haben – in den europäischen Großmächten, im Osmanischen Reich, in den USA und in der neutralen Schweiz.

Eckert, Georg / Geiss, Peter / Karsten, Arne (Hrsg.): Die Presse in der Julikrise 1914. Die internationale Berichterstattung und der Weg in den Ersten Weltkrieg. Aschendorff Verlag 2014; 272 Seiten; 14,80 €.



Christoph Jürgensen / Wolfgang Lukas / Michael Scheffel: Schnitzler-Handbuch: Leben – Werk – Wirkung

Wie in einem Brennspiegel reflektieren die Werke des Wiener Autors Arthur Schnitzler (1862–1931) einen Wandel auf nahezu allen Gebieten der bürgerlichen Kultur, in dessen Folge die „alte Welt“ des 19. Jahrhunderts abgelöst wird von einer „neuen Welt“ mit offenerem Horizont. Schnitzlers Texte behandeln die Subjekt-, Sprach- und Erkenntniskrise in der Epoche der „Klassischen Moderne“ ebenso wie die Fragen der Geschlechterrollen und -konstruktionen; sie enthüllen, welche Tabus sich u. a. mit einer überkommenen Sexualmoral verbinden, erkunden die Keime des sich bald dramatisch verschärfenden Antisemitismus und erörtern die Voraussetzungen und Konsequenzen des Ersten Weltkriegs, den Schnitzler als einer der wenigen Autoren seiner Generation von Beginn an als Katastrophe begriff.

Von knappen Einführungen abgesehen, fehlte bislang eine wirklich umfassende Darstellung von Schnitzlers Werk und seiner Wirkung. Das von den Wuppertaler Literaturwissenschaftlern Dr. Christoph Jürgensen, Prof. Dr. Wolfgang Lukas und Prof. Dr. Michael Scheffel jetzt veröffentlichte Handbuch unternimmt erstmals den Versuch, das Gesamtwerk Schnitzlers in seinem Kontext zu erschließen, d.h. die vorliegenden Erkenntnisse im Zusammenhang zu resümieren, neue Einsichten zu bieten und schließlich Anregungen zur weiteren – literaturwissenschaftlichen wie auch kultur- und medienwissenschaftlichen – Beschäftigung mit Leben und Werk Schnitzlers zu geben.

Jürgensen, Christoph / Lukas, Wolfgang / Scheffel, Michael (Hrsg.): Schnitzler-Handbuch. Leben – Werk – Wirkung. J.B. Metzler 2014; ca. 400 Seiten; 69,95 €.



Kurt Erlemann / Irmgard Nickel-Bacon / Anika Loose: Gleichnisse – Fabeln – Parabeln

Mit Sprachbildern in Theologie und Literatur beschäftigt sich eine interdisziplinäre Publikation („Gleichnisse – Fabeln – Parabeln“) der Germanistin Prof. Dr. Irmgard Nickel-Bacon sowie der Theologen Prof. Dr. Kurt Erlemann und Anika Loose (geb. Pajonzek). „Erstmalig werden die Grenzen zwischen Exegese und Literaturtheorie sowie Literaturdidaktik und Religionspädagogik bei der Behandlung von Gleichnissen, Fabeln und Parabeln überschritten“, erklärt Prof. Erlemann. Seine Kollegin Prof. Nickel-Bacon ergänzt: „Da Gleichnisse und Parabeln im Deutschunterricht verschiedener Schulstufen eine wichtige Rolle spielen, wird ein zentraler Bereich des Lehramtsstudiums zugänglich gemacht.“

Erlemann, Kurt / Nickel-Bacon, Irmgard / Pajonzek, Anika: Gleichnisse – Fabeln – Parabeln. UTB 2014; 220 Seiten; 19,99 €.

Charlotte Röhner / Heinz Sünker: Handbuch Frühe Kindheit

Pädagogin Prof. Dr. Charlotte Röhner und Sozialpädagoge Prof. Dr. Heinz Sünker haben gemeinsam mit Prof. Dr. Rita Braches-Chyrek (Uni Bamberg) sowie Dr. Michaela Hopf (Deutsches Jugendinstitut e.V.) das „Handbuch Frühe Kindheit“ veröffentlicht. Deutsche sowie international renommierte Autorinnen und Autoren beschäftigen sich darin mit der Frage „Wie vollzieht sich kindliches Aufwachsen – Leben und Erleben – von Geburt an hin zu selbständig handelnden, gesellschaftsfähigen Personen?“. Themen sind u.a. Kindheit, Bildung und Gesellschaft, Lebenslagen und Kindeswohl, Professionalisierung und institutionelle Anforderungen sowie Bildungs- und Erziehungsbereiche in der frühen Kindheit.

„Die vielfältigen Beiträge ermöglichen einen interdisziplinären Einblick“, erklärt Prof. Charlotte Röhner und Prof. Sünker ergänzt: „Es entsteht eine systematische Zusammenfassung wesentlicher analytischer Ansätze und Felder der Pädagogik, der Frühen Kindheit und der Kindheitsforschung insgesamt“.

Braches-Chyrek, Rita / Röhner, Charlotte / Sünker, Heinz und Hopf, Michaela (Hrsg.): Handbuch Frühe Kindheit. Budrich 2014; 746 Seiten; 83 €.



Volker R. Remmert: Tintenfass und Teleskop. Galileo Galilei im Schnittpunkt wissenschaftlicher, literarischer und visueller Kulturen im 17. Jahrhundert

„Die Figur Galileo Galilei ist für die europäische Wissenschaftsgeschichte, für die Kulturwissenschaften und für eine wissenschaftsgeschichtlich orientierte Literatur- und Kunstwissenschaft von großem Interesse“, sagt Dr. Volker R. Remmert, Professor für Wissenschafts- und Technikgeschichte. Er hat anlässlich des 450. Geburtstags von Galileo Galilei (1564–1642) gemeinsam mit Prof. Dr. Andrea Albrecht (Uni Stuttgart) und Dr. Giovanna Cordibella (Uni Bern/Schweiz) das Buch „Tintenfass und Teleskop. Galileo Galilei im Schnittpunkt wissenschaftlicher, literarischer und visueller Kulturen im 17. Jahrhundert“ herausgebracht. Es führt die fachlichen Einzelperspektiven von Literatur-, Kunst- und Kulturwissenschaftlern sowie Wissenschaftshistorikern zusammen. Die Autorinnen und Autoren aus Deutschland, Italien, Österreich, der Schweiz und den USA behandeln Galileo Galileis Profilierung als frühneuzeitlicher Wissenschaftler ebenso wie die kulturelle Wahrnehmung seiner Entdeckungen und Schriften.

Albrecht, Andrea / Cordibella, Giovanna / Remmert, Volker R. (Hrsg.): Tintenfass und Teleskop. Galileo Galilei im Schnittpunkt wissenschaftlicher, literarischer und visueller Kulturen im 17. Jahrhundert. De Gruyter 2014; 330 Seiten; 99,95 €.



Doris Bühler-Niederberger / Lars Alberth / Steffen Eisentraut: Kinderschutz. Wie kindzentriert sind Programme, Praktiken, Perspektiven?

Die Soziologen Prof. Dr. Doris Bühler-Niederberger, Dr. Lars Alberth und Steffen Eisentraut haben ein neues Buch zum Thema „Kinderschutz“ herausgebracht. Sie untersuchen, wie kindzentriert Programme, Praktiken und Perspektiven des Kinderschutzes in Deutschland sind. Im Mittelpunkt steht die Frage nach Art und Ausmaß, in denen Kinder – ihr Erleben, Wohlbefinden und Leiden – berücksichtigt werden. „Seit den 1990er-Jahren stellt die neue Kindheitssoziologie diese unbequeme Frage nicht nur an gesellschaftliche Verteilungen, sondern auch an Berufsgruppen, Institutionen und die wissenschaftlichen Disziplinen selbst“, sagt Prof. Bühler-Niederberger.

In der aktuellen Publikation versuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die Frage in einem interdisziplinären und den nationalen Rahmen übersteigenden Ansatz zu beantworten.

Bühler-Niederberger, Doris / Alberth, Lars / Eisentraut, Steffen (Hrsg.): Kinderschutz. Wie kindzentriert sind Programme, Praktiken, Perspektiven? Beltz Juventa Verlag 2014; 226 Seiten; 24,95 €.



Forschungseinrichtungen / Research Centers

INTERDISZIPLINÄRE ZENTREN der Bergischen Universität Wuppertal / INTERDISCIPLINARY CENTERS (IC) of the University of Wuppertal

A) FORSCHUNGSZENTREN / RESEARCH CENTERS

- Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschafts- und Technikforschung. Normative und historische Grundlagen (IZWT) / *Interdisciplinary Center for Science and Technology Studies: Normative and Historical Perspectives (IZWT)* www.izwt.uni-wuppertal.de
- Interdisziplinäres Zentrum für Angewandte Informatik und Scientific Computing (IZ II) / *Interdisciplinary Center for Applied Informatics and Scientific Computing (IC II)* www.iz2.uni-wuppertal.de
- Interdisziplinäres Zentrum für das Management technischer Prozesse (IZ III) / *Interdisciplinary Center for Technical Process Management (IC III)* www.iz3.uni-wuppertal.de
- Institut für Polymertechnologie (IFP) / *Institute of Polymer Technology (IFP)* www.ifp.uni-wuppertal.de
- Zentrum für Erzählforschung (ZEF) / *Center for Narrative Research (CNR)* www.zef.uni-wuppertal.de
- Bergisches Kompetenzzentrum für Gesundheitsmanagement und Public Health (BKG) / *Bergisch Regional Competence Center for Health Management and Public Health (BKG)* www.gesundheit.uni-wuppertal.de
- Zentrum für interdisziplinäre Sprachforschung (ZefiS) / *Center for interdisciplinary language research (ZefiS)* www.sprachforschung.uni-wuppertal.de

- Zentrum für Kindheitsforschung „Kindheiten.Gesellschaften“ / *Center for Research into Childhood and Society* Prof. Dr. Heinz Sünker, E-Mail suenker@uni-wuppertal.de
- Zentrum für reine und angewandte Massenspektrometrie / *Institute for Pure and Applied Mass Spectrometry* www.chemie.uni-wuppertal.de
- Zentrum für Editions- und Dokumentwissenschaft (IZED) / *Center for Editing and Documentology* www.ized.uni-wuppertal.de
- Jackstädtzentrum für Unternehmertums- und Innovationsforschung / *Jackstädt Center of Entrepreneurship and Innovation Research* www.jackstaedt.uni-wuppertal.de
- Forschungszentrum Frühe Neuzeit (FFN) / *Research Center for the Early Modern Period* www.fruehneuzeit-forschung.de
- Zentrum für Transformationsforschung und Nachhaltigkeit (TransZent) / *Center for Transformation Research and Sustainability (TransZent)* www.transzent.uni-wuppertal.de

B) WEITERE ZENTREN / OTHER CENTERS

- Zentrum für Graduiertenstudien (ZGS) / *Center for Graduate Studies* www.zgs.uni-wuppertal.de
- Zentrum für Weiterbildung (ZWB) / *Center for Continuing Education* www.zwb.uni-wuppertal.de

FORSCHUNGSVERBÜNDE / RESEARCH NETWORKS

- The Reacting Atmosphere – Understanding and Management for Future Generations www.atmos.physik.uni-wuppertal.de
- ATLAS-Experiment am Large Hadron Collider (LHC) am CERN / *ATLAS Experiment at the Large Hadron Collider (LHC), at CERN* www.atlas.uni-wuppertal.de
- Pierre-Auger-Observatorium / *Pierre Auger Observatory* <http://auger.uni-wuppertal.de>

SONDERFORSCHUNGSBEREICH der deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) / COLLABORATIVE RESEARCH CENTER funded by the German Research Foundation (DFG)

- „Hadronenphysik mit Gitter-QCD“ (Transregio SFB der Bergischen Universität und der Universität Regensburg) / *Hadron Physics from Lattice QCD (in cooperation with the University of Regensburg)*

GRADUIERTENKOLLEGS / RESEARCH TRAINING GROUPS

- Demographischer Wandel im Bergischen Land / *Demographic Change in the Bergisch Region* www.graduiertenkolleg.uni-wuppertal.de
- Promotionskolleg der Hans-Böckler-Stiftung „Kinder und Kindheiten im Spannungsfeld gesellschaftlicher Modernisierungen. Normative Muster und Lebenslagen, sozialpädagogische und sozialpolitische Interventionen“ / *Doctoral training group funded by the Hans Böckler Foundation: "The Impact of Social Modernization on Children and Childhood"* www.fbg.uni-wuppertal.de
- Helmholtz-Graduiertenschule für Energie und Klimaforschung (HITEC) / *Helmholtz Interdisciplinary Doctoral Training in Energy and Climate* www.fz-juelich.de/hitec

INSTITUTE der Bergischen Universität Wuppertal / INSTITUTES of the University of Wuppertal

- Institut für Europäische Wirtschaftsforschung (IEW), FB B / *Institute of European Economic Relations*
- Institut für Umweltgestaltung, FB F / *Institute of Environmental Planning* www.arch.uni-wuppertal.de
- Institut für Robotik, FB E / *Institute of Robotics* www.robotik.uni-wuppertal.de
- Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, FB D / *Institute of Foundation, Waste and Water Engineering* www.hydro.uni-wuppertal.de/igaw.html
- Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, FB D / *Institute of Structural Engineering* www.ikib.uni-wuppertal.de
- Center for International Studies in Social Policy and Social Services, FB G www.sozpaed.uni-wuppertal.de
- Institut für Gründungs- und Innovationsforschung, FB B / *Institute of Entrepreneurship and Innovation Research* www.igif.wiwi.uni-wuppertal.de
- Institut für angewandte Kunst- und Bildwissenschaften, FB F / *Institute of Applied Art History and Visual Culture* www.fbf.uni-wuppertal.de
- Institut für Sicherheitstechnik, FB D / *Institute of Safety Engineering* www.site.uni-wuppertal.de
- Institut für phänomenologische Forschung, FB A / *Institute of Phenomenological Research* www.fba.uni-wuppertal.de
- Institut für Kunst, Gestaltungstechnik und Mediendesign, FB F / *Institute of Art, Applied Design and Media Design* www.fbf.uni-wuppertal.de
- Institut für Sicherungssysteme, FB D / *Institute of Security Systems* www.sicherungssysteme.net
- Institut für Bildungsforschung (IfB), SoE / *Institute of Educational Research in the School of Education* www.ifb.uni-wuppertal.de
- Institut für Linguistik (IfL), FB A / *Institute of Linguistics* www.germanistik.uni-wuppertal.de
- Institut für Modelling, Analysis and Computational Mathematics, FB C / *Institute of Modelling, Analysis and Computational Mathematics* www.fbc.uni-wuppertal.de
- Institut für Systemforschung der Informations-, Kommunikations- und Medientechnologie (SIKoM), FB E / *Institute of Systems Research in Information, Communications and Media Technology* www.sikom.uni-wuppertal.de
- Martin-Heidegger-Institut, FB A / *Martin Heidegger Institute* www.heidegger.uni-wuppertal.de
- Institut für Partikeltechnologie, FB D / *Institute of Particle Technology* www.ipt.uni-wuppertal.de
- Wuppertaler Institut für bildungsökonomische Forschung (WIB), FB B / *Wuppertal Research Institute for the Economics of Education* www.wib.uni-wuppertal.de

INSTITUTE an der Bergischen Universität Wuppertal / ASSOCIATE INSTITUTES of the University of Wuppertal

- Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e.V. (ASER), Wuppertal / *Institute of Occupational Medicine, Safety Engineering and Ergonomics* www.institut-aser.de
- Forschungsinstitut für Telekommunikation e.V. (FTK), Wuppertal / *Telecommunications Research Institute* www.ftk.de
- Europäisches Institut für internationale Wirtschaftsbeziehungen e.V. (EIIW), Wuppertal / *European Institute for International Economic Relations* www.eiiw.eu
- Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW), Remscheid / *Tools and Materials Research Association* www.fgw.de
- Bergisches Institut für Produktentwicklung und Innovationsmanagement gGmbH (IPI), Solingen / *Bergisch Regional Institute of Product Development and Innovation Management* www.bergisches-institut.de
- Biblich-Archäologisches Institut (BAI), Wuppertal / *Institute of Biblical Archaeology* www.bai-wuppertal.de
- Neue Effizienz – Bergische Gesellschaft für Ressourceneffizienz mbH / *New Efficiency, Bergisch Association for the Efficient Use of Resources* www.neue-effizienz.de

Forschungsförderung / Kontakt

Research Funding Management / Contact

Europäische Forschungsförderung

European Research Funding Management

Ulrike Hartig / Frank Jäger / Betissa Schahabian

Tel.-Nr.: 0202/439-3806 / -2179 / -2866

E-Mail: uhartig@uni-wuppertal.de / fjaeger@uni-wuppertal.de / schahabian@uni-wuppertal.de

Nationale Forschungsförderung /

National Research Funding Management (Germany)

Carolin Sonnenschein / Tiana Wiebusch

Tel.-Nr.: 0202/439-3810

E-Mail: sonnenschein@uni-wuppertal.de / twiebusch@uni-wuppertal.de

Vertragsmanagement / Contract Management

Peter Augustin / Irina Berger

Tel.-Nr.: 0202/439-1060 / -3811

E-Mail: paugustin@uni-wuppertal.de / iberger@uni-wuppertal.de

Promotionsförderung / Support for Doctoral Students

Melanie Kraft / Frank Jäger

Tel.-Nr.: 0202/439-2983 / -2179

E-Mail: kraft@uni-wuppertal.de / fjaeger@uni-wuppertal.de

Drittmittelverwaltung, Grundsatzangelegenheiten

Administration of External Funding

Jürgen Werner

Tel.-Nr.: 0202/439-2315

E-Mail: jwerner@uni-wuppertal.de

Steuerangelegenheiten / Taxation

Silvia Wulf

Tel.-Nr.: 0202/439-3545

E-Mail: swulf@uni-wuppertal.de

Trennungsrechnungsprojekte / Public-Private Project Accounting

Nujin Öztürk / Frank Jäger

Tel.-Nr.: 0202/439-2984 / -2179

E-Mail: oeztuerk@uni-wuppertal.de / fjaeger@uni-wuppertal.de

Fachbereiche A, Projekte des Gleichstellungsbüros, Rektorats, der WTS, Verwaltung, Institute / Faculty A (Humanities), Projects of the Equal Opportunities Office, Rector's Office, Administration, UW Institutes

Astrid Volmer

Tel.-Nr.: 0202/439-3119 / E-Mail: volmer@uni-wuppertal.de

Fachbereiche B, F, G / Faculty B (Economics), F (Design and Art), G (Educational and Social Sciences)

Cornelia Biniossek

Tel.-Nr.: 0202/439-3133 / E-Mail: biniossek@uni-wuppertal.de

Fachbereich C, internationale Projekte / Faculty C (Mathematics and Natural Sciences), International Projects

Heiko Zech (Mathematik / Mathematics)

Tel.-Nr.: 0202/439-2989 / E-Mail: hzech@uni-wuppertal.de

Nujin Öztürk (Physik und Biologie / Physics and Biology)

Tel.-Nr.: 0202/439-2984 / E-Mail: oeztuerk@uni-wuppertal.de

Annerose Seidel (Chemie / Chemistry)

Tel.-Nr.: 0202/439-2375 / E-Mail: seidel@uni-wuppertal.de

Fachbereich D / Faculty D (Architecture, Civil Engineering, Mechanical Engineering and Safety Engineering)

Bärbel Prieur (Bauingenieurwesen und Sicherheitstechnik / Civil Engineering and Safety Engineering)

Tel.-Nr.: 0202/439-3710 / E-Mail: bprieur@uni-wuppertal.de

Heiko Zech (Architektur und Maschinenbau / Architecture and Mechanical Engineering)

Tel.-Nr.: 0202/439-2989 / E-Mail: hzech@uni-wuppertal.de

Fachbereich E, internationale Projekte / Faculty E (Electrical, Information and Media Engineering), International Projects

Kristoffer Frege

Tel.-Nr.: 0202/439-3307

E-Mail: frege@uni-wuppertal.de

ZEFFT: Interner Forschungsfördertopf

Um exzellente Forschung an der Bergischen Universität zu stärken und Forschungsaktivitäten gezielt zu unterstützen, hat das Rektorat eine interne Forschungsförderung in Gestalt eines Zentralen Forschungsfördertopfes (ZEFFT) installiert. Die Konzeption dieses Forschungsfördertopfes und die Vergaberegeln wurden in Kooperation zwischen der entsprechenden Senatskommission und dem zuständigen Forschungs-Prorektor, Prof. Dr. Michael Scheffel, ausgearbeitet. Im Ergebnis wird zur Zeit jährlich ein Betrag von 500.000 Euro zur Hilfe bei der Beantragung von Drittmittelprojekten zur Verfügung gestellt. Antragsmöglichkeiten gibt es in zwei Bereichen: Der Bereich Strukturen hat zum Ziel, die Einrichtung von Forschungsverbänden zu fördern; der Bereich Projekte unterstützt Forscherinnen und Forscher bei der Vorbereitung von Einzelanträgen.

Auskunft gibt es in der Abteilung Forschungsförderung und Drittmittelabwicklung:

Carolin Sonnenschein

Tel.-Nr.: 0202/439-3810

E-Mail: sonnenschein@uni-wuppertal.de

Betissa Schahabian

Tel.-Nr.: 0202/439-2866

E-Mail: schahabian@uni-wuppertal.de

www.forschung.uni-wuppertal.de

AWG WUPPERTAL | IHR ENTSORGER

www.6tant.com



ABFALLMANAGEMENT
AUTORECYCLING
CONTAINERSERVICE
MÜLLABFUHR
MÜLLHEIZKRAFTWERK
PAPIERSAMMLUNG
RECYCLINGHÖFE
SCHADSTOFFSAMMLUNG
WERTSTOFFSAMMLUNG

AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal
Korzert 15 - 42349 Wuppertal
Telefon 0202 / 40 42-0
www.awg.wuppertal.de



Jetzt in Ihrem App-Shop die AWG-Abfall - App!



Eine gute Verbindung.



Die langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der Bergischen Universität und der Sparkasse Wuppertal ist ein wichtiger Motor, der die Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft weiter vorantreibt. Beide Einrichtungen leisten damit einen maßgeblichen Beitrag zur regionalen Identität als Wissenschaftsstandort. Wir begrüßen das neue Semester an der Bergischen Universität und wünschen Ihnen einen guten Start. Wenn Sie auch mit Ihren Finanzen durchstarten wollen, steht Ihnen die Sparkasse Wuppertal als kompetenter Ansprechpartner gerne zur Verfügung. **Wenn's um Geld geht – Sparkasse.**