

forschen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Smart Interfaces

Nanofasern

Was schnelle Computer
und Krebsmedizin verbindet

► Seite 14

Wärmeübertragung

Vom Frühstücksei
zur Chipkühlung

► Seite 34

Akku leer –

bald nicht mehr?!

► Seite 42

Der steigende Energiebedarf ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Und die erste in Ihrem neuen Job.

**AREVA NP sucht 800 Persönlichkeiten.
Jedes Jahr. In Deutschland.**



Stellen Sie sich gemeinsam mit AREVA NP den großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts: der Sicherung des wachsenden Energiebedarfs, dem Kampf gegen die globale Erwärmung durch CO₂-freie Energieerzeugung und der Verantwortung für zukünftige Generationen. Als eines der führenden Energietechnikunternehmen der Welt gehen wir konsequent neue Wege – dies

gilt in besonderem Maße für die Förderung unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Wir bieten ihnen vielfältige individuelle Entwicklungschancen, gezielte Qualifizierungsprogramme und anspruchsvolle Aufgaben. Denn wir wissen, dass unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ihren Fähigkeiten unsere Zukunft sind.

Ingenieure (w/m), Naturwissenschaftler (w/m) und Techniker (w/m) mit und ohne Berufserfahrung haben bei uns beste Perspektiven.

Bitte bewerben Sie sich online unter: www.aveva-np.com/karriere.



Liebe Leserinnen und Leser,

ein Wissenschaftler erhält nicht jeden Tag die Gelegenheit, seine Forschung einem breiten Publikum darstellen zu können. Umso reizvoller war das Angebot an die Mitglieder des Exzellenz-Clusters „Smart Interfaces“, diese Ausgabe gemeinsam gestalten zu können. Ob Sie Student, Absolvent, Fakultät oder Freund der TU Darmstadt sind, freuen wir uns, Ihnen einen Einblick in die Welt der Fluidgrenzflächen zu geben, eine Welt, die zwar physikalisch nicht immer leicht zu beschreiben ist, aber doch im alltäglichen Leben eine sehr große Rolle spielt. Daher, obwohl es am Cluster überwiegend um Grundlagenforschung geht, haben die verschiedenen Autoren versucht, einen Bogen zur Praxis zu spannen; hoffentlich erkennen Sie auch einiges aus Ihrem Alltag. Zugleich bieten uns die Artikel die Gelegenheit, über die Aufbauarbeiten und die Struktur des Exzellenz-Clusters „Smart Interfaces“ Bericht zu erstatten. Mit vier Berufungen, drei Ernennungen zum Honorarprofessor, ein Gebäude in Rekordzeit und über 60 Mitarbeitern nimmt das Cluster langsam die Form an, wie es im Antrag konzipiert war. Für alle Beteiligten ist es eine spannende Zeit. Mit fünf Fachbereichen und vier außeruniversitären Forschungsinstituten besteht die Aufgabe darin, gemeinsame Forschungsziele und abgestimmte Vorgehensweisen schnell in messbare Ergebnisse umzusetzen. Dass wir jetzt schon auf einem erfolgreichen Kurs sind, haben wir vielen Leuten zu verdanken: den Wissenschaftlern, den Mitarbeitern des Clusters und der Universitätsverwaltung, die alle das straffe Bautempo mitgemacht haben. Aber insbesondere muss anerkannt werden, dass so ein Cluster undenkbar wäre ohne die vielen exzellent ausgebildeten Studenten der TU Darmstadt, die sich für eine weiterführende Ausbildung begeistern ließen. Und hierin liegen die eigentlichen Wurzeln von Exzellenz!



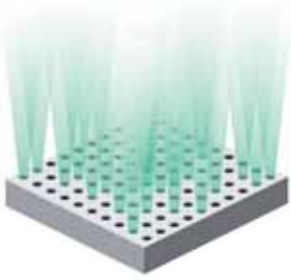
Cameron Tropea ist seit 1997 Professor für Strömungslehre und Aerodynamik an der TU Darmstadt und seit 2007 Direktor des Center of Smart Interfaces.

Dear Readers,

it is not every day that a scientist gets the opportunity to present his work to a wide general audience, which made the opportunity for the members of the Excellence Cluster “Smart Interfaces” to contribute to this issue even more attractive. Regardless of your background – student, graduate, faculty or friend of the TU Darmstadt, we are delighted to introduce you into the realm of fluid interfaces, a topic which is not always easy to physical describe, but which influences our daily lives greatly. Although much of this research is very fundamental in nature, the authors of this issue have attempted to bridge the gap to practical applications and we hope that you as a reader also recognize some of those everyday occurrences where fluid interfaces are a determining factor. At the same time such an issue offers the possibility to report about the developments and structure of the Excellence Cluster “Smart Interfaces”. With four professorial appointments, three honorary professorships, a new building in record time and over 60 employees, the Cluster is beginning to take on its final form. For everyone involved it is an exciting time. With five faculties and four external institutes the challenge is to define and implement common research goals and produce tangible results in a short time period. The fact that we are well on our way to meeting this challenge is due to the efforts and cooperation of many different people – the researchers, the employees of the Cluster, the university administration – all of which were able to keep up the fast pace in the build-up phase. But also the excellently educated students from TU Darmstadt deserve special mention, without whom the many doctoral positions at the Cluster could never have been filled in such a short time. And herein lies the true roots of excellence!

*For everyone
involved it
is an exciting
time.*

Professor Dr.-Ing. Cameron Tropea



Smart Interfaces – ein Exzellenz-Cluster an der TU Darmstadt

- 4** ► Die Forschung des Clusters befasst sich mit Grenzflächen, bei denen Fluide mit einer festen Wand wechselwirken. Wie diese Grenzflächen „intelligent“ gemacht werden, wird am Center of Smart Interfaces untersucht.

Von Cameron Tropea

Grenzflächen auf molekularer Ebene

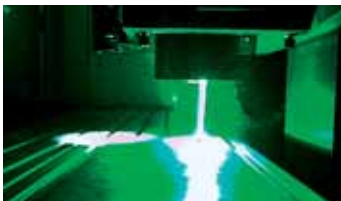
- 8** ► Molekulardynamik-Simulationen tragen zu einem besseren Verständnis der molekularen Vorgänge und der Vorhersage der Struktur und Dynamik an Grenzflächen bei.

Von Nico van der Vegt und Florian Müller-Plathe

Nanofasern – was schnelle Computer und Krebsmedizin verbindet

- 14** ► Die Technologie des Elektrosinnens erlaubt die Herstellung ultradünner Fasern, welche ein äußerst vielseitiges Basismaterial zur Entwicklung funktionaler Oberflächen bieten.

Von Alexander L. Yarin, Tatiana Gambaryan-Roisman und Clarissa Steffes



Funktionale Oberflächen – mikroskopische Tausendsassas

- 18** ► Die Relevanz funktionaler Oberflächen im Bereich der Fertigung ist enorm. Ihre Wirkung zu Gunsten von Prozessoptimierungen, aber auch bereits ihre Erzeugung beschäftigt das Center of Smart Interfaces an der TU Darmstadt.

Von Eberhard Abele, Benjamin Fröhlich, Peter Groche und Cécile Müller

Smart Interfaces – superhydrophobe Oberflächen

- 24** ► Durch superhydrophobe Beschichtung perlt Wasser von Oberflächen ab und nimmt den darauf abgelagerten Schmutz mit. Dieses besondere Kontakt- und Strömungsverhalten eröffnet Beschichtungen mit revolutionären Eigenschaften.

Von Ilia Roisman, Andreas Lembach, Doris Vollmer und Hans-Jürgen Butt

Wasser – Energiequelle der Zukunft?

- 28** ► Die Erzeugung von Wasserstoff durch direkte photoelektrochemische Umwandlung von Sonnenlicht stellt einen eleganten Weg dar, Sonnenenergie zu speichern. Die Optimierung solcher Systeme wird zur Zeit intensiv untersucht.

Von Bernhard Kaiser, Benoit Gobaut und Wolfram Jaegermann



Wärmeübertragung – vom Frühstücksei zur Chipkühlung

- 34** ► Blasensieden ist eine effiziente Form der Wärmeübertragung – vom Haushalt bis zur Raumfahrt, vom Mikrochip bis zum Kraftwerk. Grundlagen hierzu werden am Fachgebiet Technische Thermodynamik erforscht.

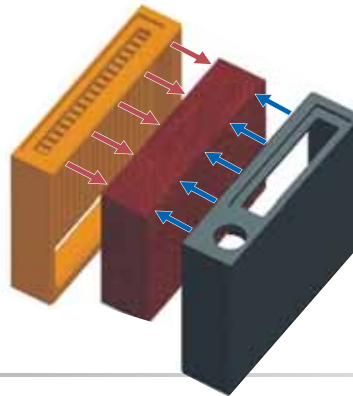
Von Peter Stephan, Steffen Hardt, Christian Kunkelmann, Nils Schweizer und Axel Sielaff

Akku leer – bald nicht mehr?!

42

Die Entwicklung einer umweltfreundlichen und leistungsfähigen Alternative zur Batterie.

Von Thomas Kania, Boris Schilder, Peter Stephan, Steffen Hardt und Andreas Dreizler

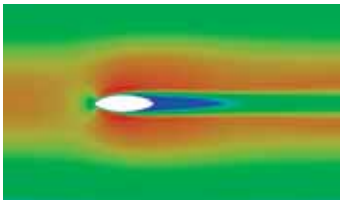


Laserspektroskopie zur Untersuchung von Grenzschichten

48

Für ein besseres Verständnis von Austauschprozessen zwischen Gasen und umgebenden Wänden werden laserspektroskopische Messmethoden genutzt. Licht dient somit als störungsfreies hochpräzises Messwerkzeug.

Von Andreas Dreizler und Jan Brübach



Mathematik macht Interfaces smarter

54

Im Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt wird intensiv an Modellen aus dem Bereich der Strömungsmechanik geforscht. Der Artikel stellt einige der Aktivitäten vor, die mit dem Center of Smart Interfaces verknüpft sind.

Von Dieter Bothe, Reinhard Farwig, Matthias Hieber und Stefan Ulbrich

Turbulenzen unter Kontrolle bringen

58

Wirbel, die in turbulenten Strömungen auftreten, führen zu signifikanten Energieverlusten. Durch gezielte Kontrolle der Turbulenzen können Energieersparnisse erzielt werden.

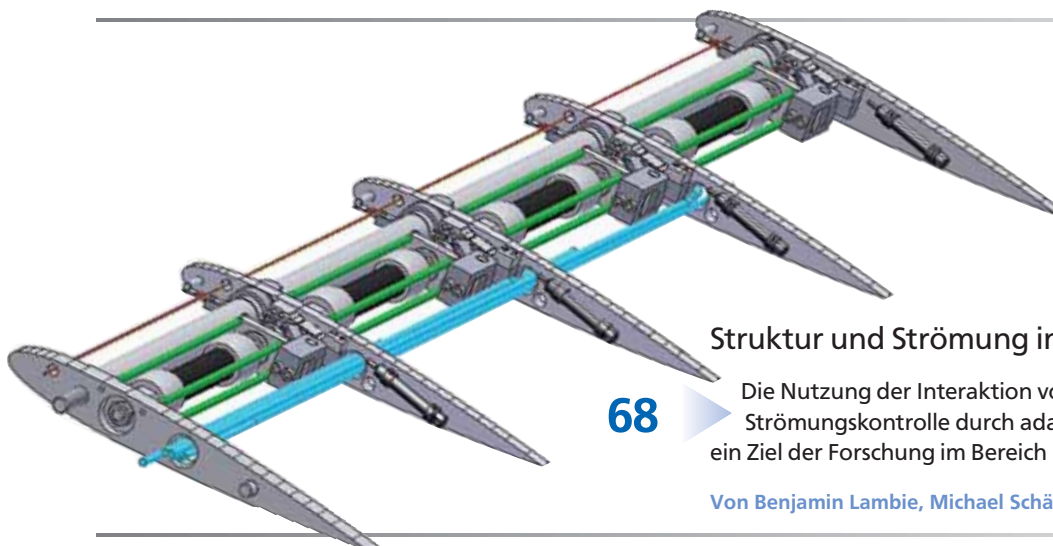
Von Bettina Frohnäpfel und Jovan Jovanović

Plasma zur Strömungskontrolle

64

Zur Beeinflussung von Strömungen werden am Center of Smart Interfaces, Drag and Circulation Control, „hochspannende“ Plasma-Aktuatoren verwendet und deren Einfluss auf Widerstand und Auftrieb untersucht.

Von Sven Grundmann, Alexander Duchmann, Katrin Barckmann und Armin Kurz



Struktur und Strömung im Wechselspiel

68

Die Nutzung der Interaktion von Struktur und Strömung zur Strömungskontrolle durch adaptive Steifigkeitsänderungen ist ein Ziel der Forschung im Bereich „Drag and Circulation Control“.

Von Benjamin Lambie, Michael Schäfer, Thilo Bein und Holger Hanselka

Smart Interfaces – ein Exzellenz-Cluster an der TU Darmstadt

In Darmstadt heißt Exzellenz Interdisziplinarität: am Center of Smart Interfaces forschen Wissenschaftler aus den Fachbereichen Chemie, Maschinenbau, Mathematik, Materialwissenschaften und Physik sowie aus vier außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Darmstadt und Mainz, welche durch die Grundlagen der Strömungsmechanik an Grenzflächen verbunden sind.

► *Smart Interfaces: A Cluster of Excellence at the TU Darmstadt*

Excellence in Darmstadt is interdisciplinary: at the Center of Smart Interfaces researchers from many faculties (Chemistry, Mechanical Engineering, Mathematics, Material Science and Physics) as well as from neighbouring institutions in Darmstadt and Mainz are under one roof to carry out basic research in the area of fluid mechanics and the control of boundary-layer phenomena.

Cameron Tropea • Die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder ist mit dem Ziel einberufen worden, Spitzenforschung an deutschen Hochschulen zu unterstützen und damit den Wissenschaftsstandort Deutschland im internationalen Wettbewerb zu stärken.

Die TU Darmstadt konnte 2007 in der zweiten Ausschreibungsrunde das Exzellenzcluster „Smart Interfaces: Understanding and Designing Fluid Boundaries“, mit einem Fördervolumen von 34,6 Millionen Euro gewinnen. Daraus entstand das Center of Smart Interfaces (CSI), das Wissenschaftler der TU Darmstadt mit neuen Professoren und Nachwuchsgruppen sowie Gast-Professoren, Post-Docs und Doktoranden aus den Fachbereichen Maschinenbau, Physik, Chemie, Mathematik und Materialwissenschaften der TU Darmstadt sowie aus vier außeruniversitären

Abbildung 1
Organisation des
Center of Smart
Interfaces.

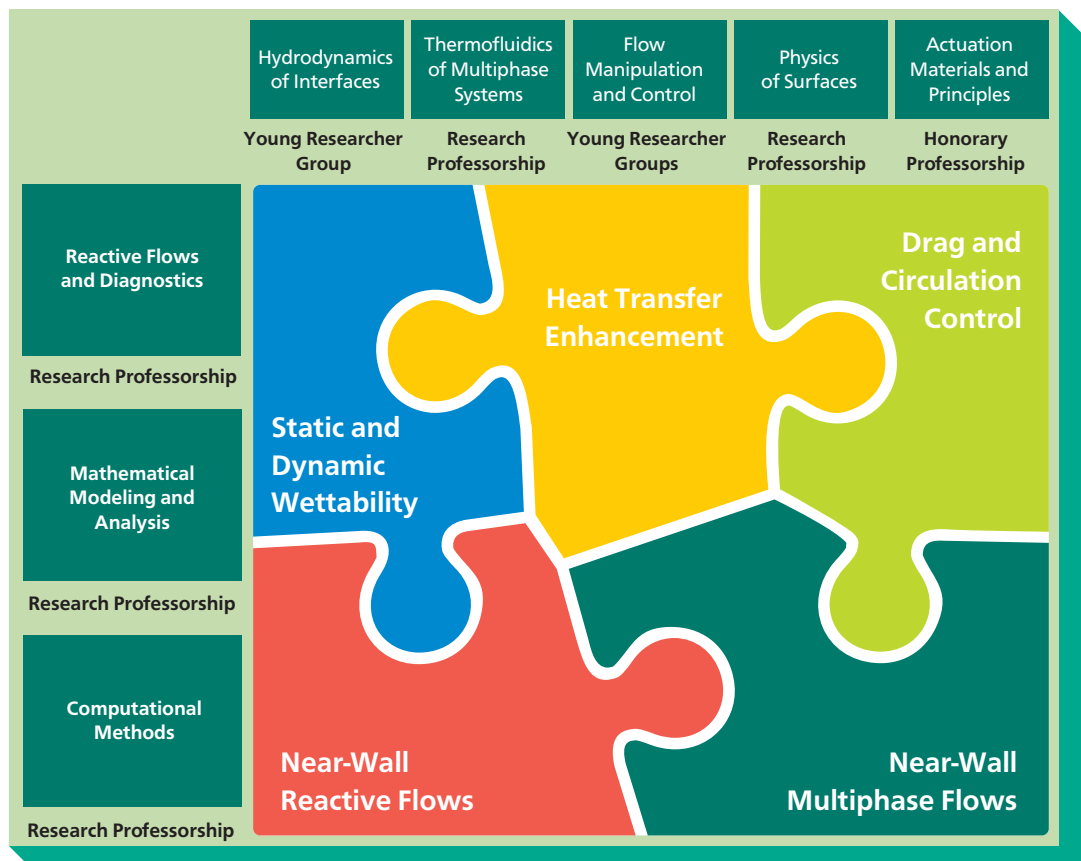
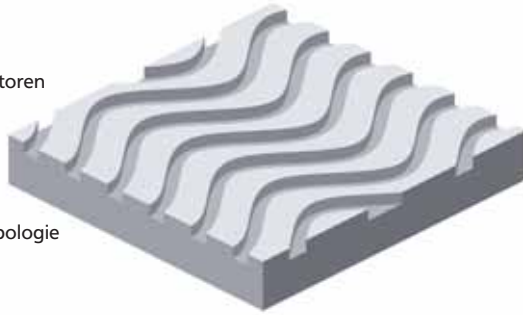
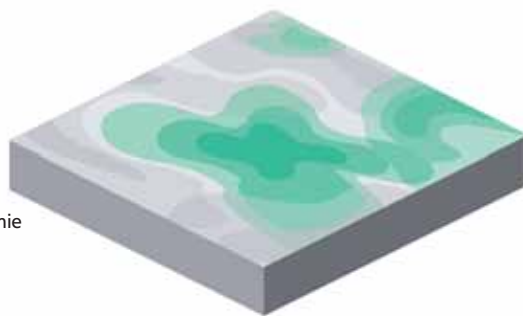


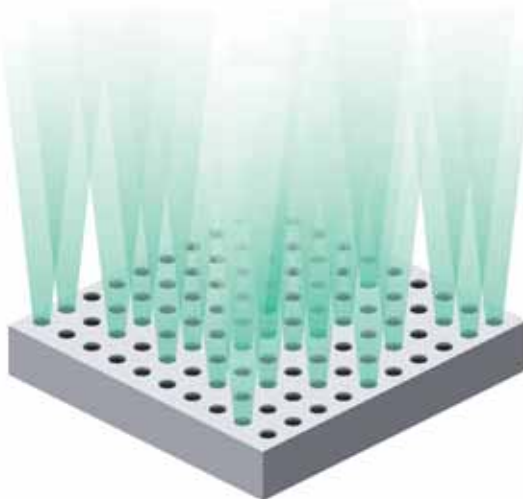
Abbildung 2

Beeinflussungsfaktoren
von Grenzflächen

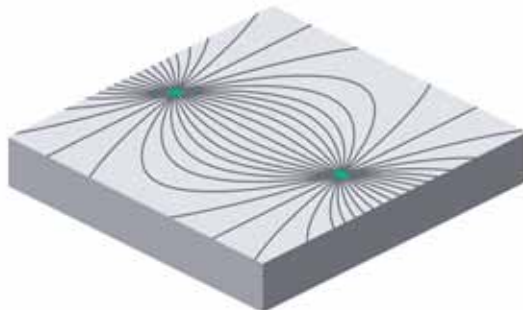
Morphologie / Topologie



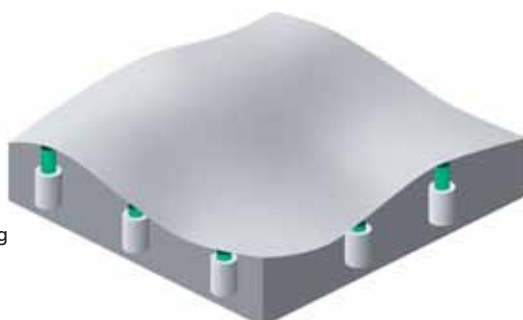
Physikalische Chemie



Wanddurchflüsse



Volumenkräfte



Relative Bewegung

Forschungseinrichtungen in Darmstadt und Mainz (Institut für Mikrotechnik Mainz, Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, Deutsches Kunststoffinstitut) verbindet.

Die Forschung des Clusters befasst sich mit Grenzflächen, bei denen Fluide wie Gas oder Flüssigkeit mit einer festen Wand wechselwirken. Die Bezeichnung „Smart Interfaces“ bezieht sich auf intelligente Grenzflächen, die gezielt entworfen werden, um den Massen-, Impuls- oder Wärmetransport zu verbessern. Die Methoden des CSI finden zahlreiche industrielle Anwendungen im Maschinenbau und darüber hinaus, beispielsweise in der Motorenentwicklung, dem Flugzeugbau, in der Beschichtungs- oder Drucktechnik oder in verfahrenstechnischen Anlagen.

Aus der Forschungsthematik ergeben sich innerhalb des CSI fünf eng verflochtene Forschungsbereiche, die sich insgesamt mit der Gestaltung, der Weiterentwicklung und der Anwendung intelligenter Grenzflächen an den Rändern einer Strömung befassen und einen erfolgreichen Technologietransfer in die Industrie garantieren:

Statische und dynamische Benetzbarkeit

Die Ausbreitung von Flüssigkeiten auf Oberflächen fester Körper – die „Benetzung“ – ist bei vielen technischen Prozessen, etwa beim

Grenzflächen

In der Strömungsmechanik bilden sich zwischen festen Berandungen und Fluiden – Gase oder Flüssigkeiten – Grenzschichten aus, wobei die Gradienten des Impulses, der Energie (Temperatur) oder der Konzentration sehr viel höhere Werte als in den übrigen Strömungsgebieten erreichen. Somit ist das Verhalten der Grenzflächen sehr oft entscheidend für den Impuls-, Wärme- oder Stofftransport. Verbesserungen oder eine kontrollierte Steuerung dieser Transportgröße ist ein zentrales Thema des Exzellenz-Clusters. Mögliche Einflussfaktoren sind Volumenkräfte (elektromagnetisch, Schwerkraft), Morphologie/Topologie, physikalische Chemie, relative Bewegungen oder Flüsse durch die Wand (Stoff, Wärme, Ladung, Masse).



Drucken, von großer Bedeutung. Die Dynamik der Benetzung ist bisher nur für einfache Flüssigkeiten auf glatten, homogenen Oberflächen verstanden. Die Benetzung von komplexen Flüssigkeiten, wie Dispersionen (z.B. Farben), Polymerschmelzen oder Emulsionen (Milch, Mayonnaise etc.) ist jedoch für technische Anwendungen besonders wichtig. Ein besseres Verständnis der Benetzung komplexer Flüssigkeiten auf unterschiedlich beschaffenen Oberflächen wird deshalb zahlreiche technische Prozesse verbessern.



Verbesserung des Wärmetransports

Die Verbesserung der Wärmetransporteigenschaften an Oberflächen kann in vielen technischen Anlagen und Geräten Energieeinsparungen oder höhere Leistungen ermöglichen. Beispielsweise kann durch die effiziente Kühlung von Oberflächen der Wirkungsgrad von Gasturbinen ebenso verbessert werden wie die Leis-

tung von Computerchips und der Energieverbrauch von Fahrzeugmotoren. Zur Verbesserung der Wärmetransporteigenschaften werden zum Beispiel die Oberflächen gezielt mit Mikrostrukturen versehen oder die Benetzungseigenschaften verändert.



Wandnahe reaktive Strömungen

Die Effizienz und Steuerbarkeit von verfahrenstechnischen Anlagen und Reaktoren werden oft wesentlich von Transportvorgängen in wandnahen Strömungen bestimmt. Durch die Untersuchung chemisch reagierender Strömungen und die gezielte Beeinflussung wandnaher Transportprozesse kann die Effizienz und Steuerbarkeit vieler Anlagen verbessert werden. Beispiele sind katalytische Brenner (u.a. in der Haushaltstechnik), Verlöschvorgänge in Fahrzeugmotoren oder auch verfahrenstechnische Prozesse wie z.B. die CO₂-Abscheidung in Fallfilmreaktoren.



Wandnahe Mehrphasenströmungen

Strömungen von Dispersionen, diskontinuierliche Strömungen und Strömungen mit Phasenwechsel (Erstarrung/Verdampfung) sind Untersuchungsgegenstand dieses Forschungsge-



Abbildung 3
Verschiedene
Disziplinen unter
einem Dach.

bietet. Hierbei werden beispielsweise der Tropfen- oder Sprayaufprall von Flüssigkeitgemischen, Suspensionen oder Emulsionen auf poröse und strukturierte Oberflächen untersucht, um grundlegende Erkenntnisse für das Verständnis dieser Strömungsformen zu gewinnen. Die daraus ableitbaren Ergebnisse, wie z. B. die Entwicklung von Strategien zur Beeinflussung und Steuerung der Strömungsstrukturen, fließen in die Arbeiten der übrigen Forschungsgebiete des CSI ein.

Widerstands- und Zirkulationssteuerung

Der Auftrieb und der Widerstand von umströmten Flächen spielen eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit und Effizienz von Maschinen und Fahr- oder Flugzeugen. In diesem Forschungsgebiet werden passive und aktive Verfahren zur Beeinflussung wandnaher Strömungen eingesetzt, um dadurch das globale Strömungsbild, insbesondere aber den Auftrieb und Widerstand gewinnbringend zu beeinflussen. Damit kann beispielsweise die optimale Umströmung eines Profils bei unterschiedlichen Anströmbedingungen eingestellt

werden, z. B. für den optimalen Betrieb einer Windkraftanlage bei böigen Windverhältnissen.

Gut positioniert

Die Förderung der Exzellenzinitiative ist zunächst auf einen Zeitraum von fünf Jahren bis Oktober 2012 befristet. Eine Weiterentwicklung der Initiative durch Bund und Land über die ersten fünf Jahre hinaus wird erwartet. Ein Ziel des Centers ist es dementsprechend sich in den kommenden Jahren für diesen neuen Wettbewerb gut zu positionieren. Noch im Zeitraum der ersten Förderperiode wird die Errichtung eines Neubaus erwartet, bis zur Fertigstellung nutzen die Mitarbeiter des CSI das Interimsgebäude auf der Lichtwiese (L1/08, Petersenstraße 32), welches im Januar 2009 eingeweiht wurde.



Cameron Tropea leitet das Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik an der TU Darmstadt. Er ist derzeit Direktor des Center of Smart Interfaces.

Grenzflächen auf molekularer Ebene

Die makroskopischen Wechselwirkungen an einer Grenzfläche wie Adsorption, Benetzbarkeit oder Haftung werden letztendlich durch ihre chemische Struktur auf molekularem Niveau bestimmt. Mit Molekulardynamik-Simulationen werden die molekularen Strukturen und Prozesse nachgestellt und untersucht, die zu dem beobachteten Verhalten führen. Dies ermöglicht nicht nur ein tieferes und von



Annahmen freies Verständnis der molekularen Vorgänge. Simulationen sind mittlerweile auch ein unverzichtbares Werkzeug, wenn es darum geht, bessere Oberflächenstrukturen oder geeignetere Fluidphasen vorzuschlagen und vorherzusagen.

► Interfaces on the Molecular Scale

The macroscopic behaviour at an interface, such as adsorption, wettability or adhesion, is ultimately determined by its chemical structure at the molecular level. Molecular dynamics simulations model in the computer the molecular structures and processes, which are responsible for the observed behaviour. They allow not only a fundamental insight into the molecular processes, which is free from a-priori assumptions and approximations. They are also an indispensable tool for suggesting better surface structures or more suitable fluids and for predicting their properties.

Nico van der Vegt und Florian Müller-Plathe •

Grenzflächen lassen sich auf viele Weisen betrachten und untersuchen. Im täglichen Leben nehmen wir Grenzflächen makroskopisch wahr. Wir sehen die Wellen auf dem Wasser, die glänzende Oberfläche einer Lackierung oder den Tropfen, der an einer Scheibe herunter läuft. Es gibt viele weitere Grenzflächen, die dem bloßen Auge verborgen bleiben. Das sind zum einen die versteckten Grenzflächen im Inneren von Materialien oder Fluiden: der Lackaufbau besteht aus verschiedenen Phasen, das Wasser enthält Schwebstoffe oder Luftblasen, Lebewesen sind durch eine Vielzahl innerer Grenzflächen kompartimentalisiert. Zum anderen sind Strukturen an Grenzflächen oft zu klein, um ohne Hilfsmittel sichtbar zu sein. Oberflächenstrukturen in der Größe von Mikrometern, und heutzutage zunehmend Nanometern, bestimmen häufig das Verhalten der Grenzflächen nachhaltig. Zu ihrer Betrachtung helfen diverse mikroskopische Techniken, z.B. optische Mikroskope, Elektronenmikroskope oder Rasterkraftmikroskope.

Alle Grenzflächeneigenschaften und -funktionen werden aber letztlich vom Zusammenwirken der Atome und Moleküle auf beiden Seiten der Grenzfläche bestimmt. Ob der Wassertropfen die Oberflächen benetzt oder von ihr abperlt, ob der Klebstoff haftet, ob der Lack glänzt und welche Nährstoffe eine biologische Zelle aufnimmt, ist durch molekulare Strukturen und Mechanismen vorgegeben. Diese lassen sich in Einzelfällen experimentell untersuchen. Im Allgemeinen steht aber wegen der Kleinheit der Strukturen und der hohen Geschwindigkeit ihrer Veränderung keine Messmethode zur Verfügung.

Es ist jedoch möglich, sie im Computer zu simulieren. Dazu verwenden wir Verfahren der molekularen Simulation wie Molekulardynamik oder Monte Carlo. Diese basieren auf molekularen Modellen, bei denen jedes einzelne Atom der betrachteten Grenzfläche im Rechner dargestellt wird. Die Wechselwirkungen zwischen den Atomen werden so genau und realitätsnah wie möglich angesetzt und parametrisiert. Die Parameterisierung ist heute so weit fortgeschritten, dass zuverlässige molekulare Modelle von Grenzflächen erzeugt werden können. Die Wechselwirkung zwischen Atomen führt zu Kräften zwischen ihnen, diese verursachen Bewegung der Atome, so dass das System sich in der Zeit entwickelt. Diese zeitliche Entwicklung wird in der Simulation nachvollzogen, so dass Prozesse untersucht werden können.

In unseren Arbeitsgruppen untersuchen wir verschiedene Grenzflächen, Strukturen und Prozesse mit molekularer Simulation, von denen wir im Folgenden einige Beispiele aufführen.

Superhydrophobie und Lotus-Effekt

Pflanzenblätter wie die des Lotus (Abb. 1) zeichnen sich durch eine extreme Hydrophobie aus: Wasser perlt von ihnen ab wie von einer heißen Herdplatte. Damit einher geht eine starke Schmutzabweisung. Die Hydrophobie erreicht der Lotus unter anderem durch die chemische Beschaffenheit seiner Oberfläche. Diese zu kopieren und womöglich zu verbessern, ist ein Forschungsziel, welches wir in Zusammenarbeit mit der Industrie verfolgen. Hier wenden wir molekulardynamische Methoden nicht nur an, sondern entwickeln auch neue, so zum Beispiel zur Berechnung von Grenzflächen- spannungen.

**Abbildung 1**

Der Lotus wächst im Sumpf und hat doch immer saubere Blätter. Das erreicht er durch eine so genannte superhydrophobe Chemie und Struktur der Blattoberfläche, die Regentropfen abrollen lässt, welche dabei Schmutzpartikel mitnehmen. Computersimulation hilft bei der Umsetzung dieses Lotus-Effekts für technische Oberflächen.

Abbildung 2

Auch Tropfen auf Oberflächen lassen sich molekular simulieren. Daraus lernt man, welche molekularen Mechanismen zu Haftung und Benetzung beitragen, aber auch wie sich Tropfen unter externen Einflüssen bewegen oder verändern. Übrigens: Mit molekularer Simulation lässt sich auch verstehen, wieso die Klebzettel am Bildschirm halten.

Dynamik von Tropfen auf Oberflächen

Auf molekularer Ebene weitgehend unverstanden sind Prozesse in nicht-stationären Tröpfchen, also Tröpfchen, die von einer externen Kraft über die Oberflächen bewegt werden, die auf eine Oberfläche aufprallen oder die gerade dabei sind, von einer Oberfläche zu verdampfen (Abb. 2). Dabei sind diese Prozesse umso schwieriger zu beschreiben, je extremer ihre Situation vom Gleichgewichtszustand abweicht. Beispiele dafür sind Tropfen, die mit Höchstgeschwindigkeit auf Oberflächen auftreffen oder die bei starker Überhitzung verdampfen. Da die molekulare Simulation außer den Wechselwirkungen zwischen

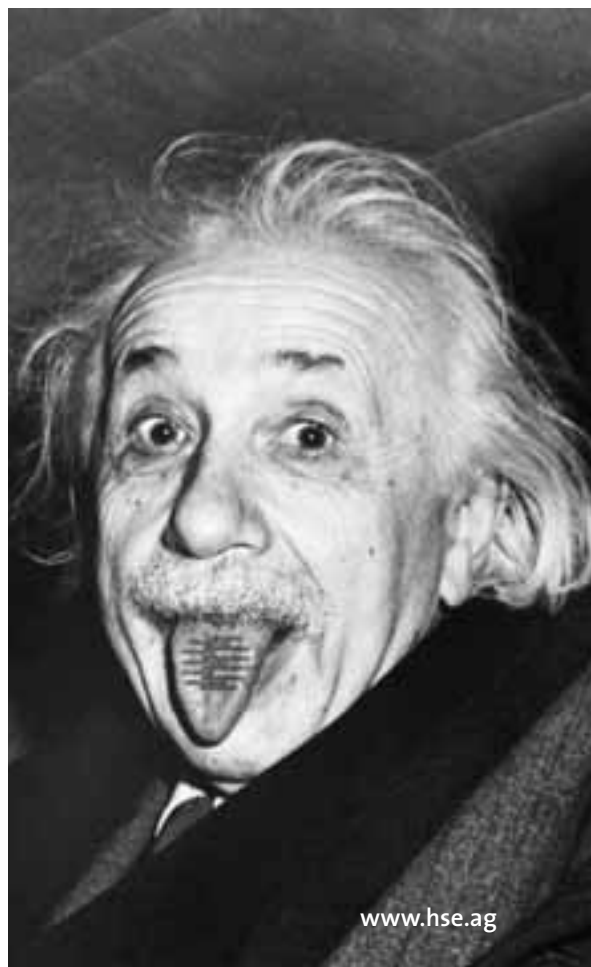
Atomen a priori keine weiteren Annahmen macht, kann sie hier wertvolle Hinweise auf die molekularen Abläufe liefern, die dann wiederum in die Modellbildung auf höherer Ebene, beispielsweise in Kontinuumsmodelle, einfließen können. Wichtige molekulare Prozesse sind der Transport von Materie (Diffusion, Verdampfung) und Wärme (Wärmeleitung) und ihre Kopplung.

Polymere und komplexe Fluide an Grenzflächen

Wenn es sich bei der Phase, die mit der Oberfläche wechselwirkt, nicht um eine einfache Flüssigkeit wie Wasser handelt, sondern um ein Medium mit inneren Freiheitsgraden, verursacht



ANZEIGE



www.hse.ag

Wir sind bereit für kluge Köpfe.

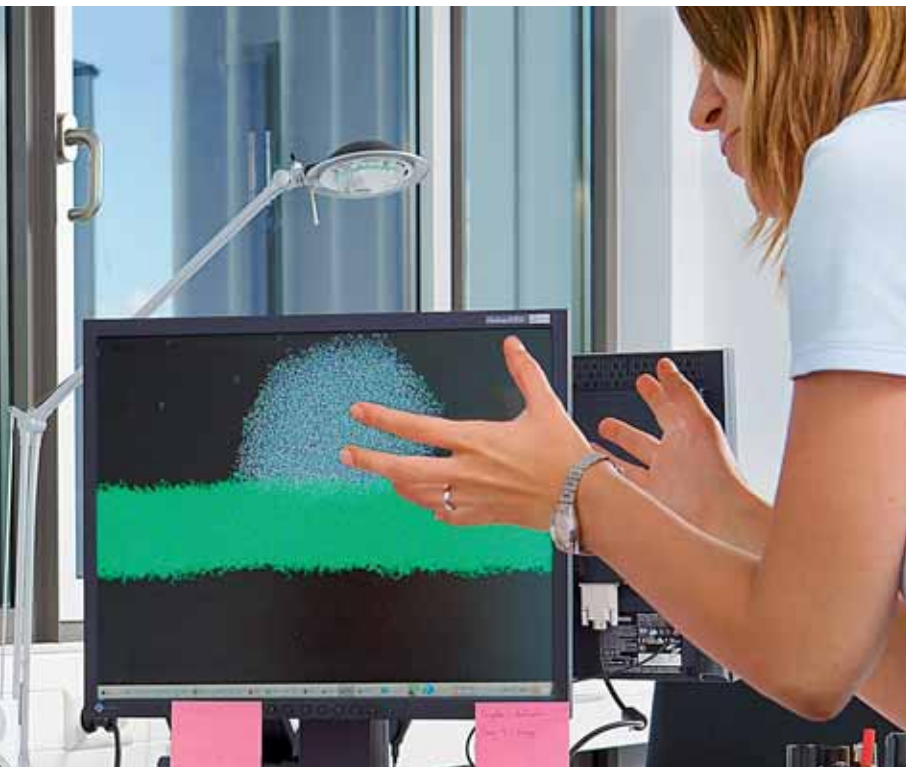
Unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stellen sich täglich den Herausforderungen des dynamischen Energiemarkts. Dafür brauchen wir auch in Zukunft kluge Köpfe, die mit Engagement und Ideen die Energie- und Trinkwasserversorgung von morgen sicherstellen.

Wenn Sie Interesse an einer Mitarbeit bei uns haben, sei es als Absolvent/in, Praktikant/in oder Diplomand/in, wenden Sie sich bitte an:

HEAG Süd Hessische Energie AG (HSE), Personal,
Landwehrstraße 55, 64293 Darmstadt
Tel.: 06151 701-1400, E-Mail: personal@hse.ag

Weitere Informationen über uns sowie unsere aktuellen Stellenangebote finden Sie unter www.hse.ag

HSE 
HEAG Süd Hessische Energie AG



die Präsenz der Grenzfläche Rückwirkungen auf die innere Struktur des Mediums. Diese Änderungen vollziehen sich häufig auf molekularer Ebene. Sie werden bereits bei einfachen Lösungen sichtbar, wenn eine Komponente bevorzugt absorbiert. Abbildung 3 zeigt die wässrige Lösung einer Aminosäure, deren Phenylgruppe eine planare Adsorption auf einer Nickel-Oberfläche ermöglicht. Komplexere Fluide sind beispielsweise mehrphasige Flüssigkeiten wie Suspensionen, Dispersionen und kolloidale Lösungen.

Hier kann die Oberfläche dazu führen, dass Partikel sich in ihrer Nähe anreichern, abreichern, zu Über-

—ANZEIGE

YOUR CHALLENGE: A TECHNICAL CAREER FOR ENGINEERS!

Procter & Gamble ist eines der erfolgreichsten Markenartikelunternehmen der Welt. In Deutschland sind wir inklusive Wella, Gillette und Braun mit ca. 15.000 Mitarbeitern an 18 Standorten vertreten.

The thrill of technology – Procter & Gamble sucht Talente

Wir suchen Ingenieure/Ingenieurinnen und Naturwissenschaftler/-innen mit hohem fachlichen Anspruch und Gespür für das Machbare für die Einsatzbereiche Research & Development, Engineering und Manufacturing. Weltklasseprodukte herzustellen ist nur mit state-of-the-art Technologie möglich. Weltklasseprodukte zu entwickeln bedeutet, auch technisch der Konkurrenz immer einen Schritt voraus zu sein. Das gelingt nur mit technischen Innovationen!

Wir bieten Praktika, Diplomarbeiten und Direkteinstieg.

Weitere Informationen findest du unter:

www.pgcareers.com

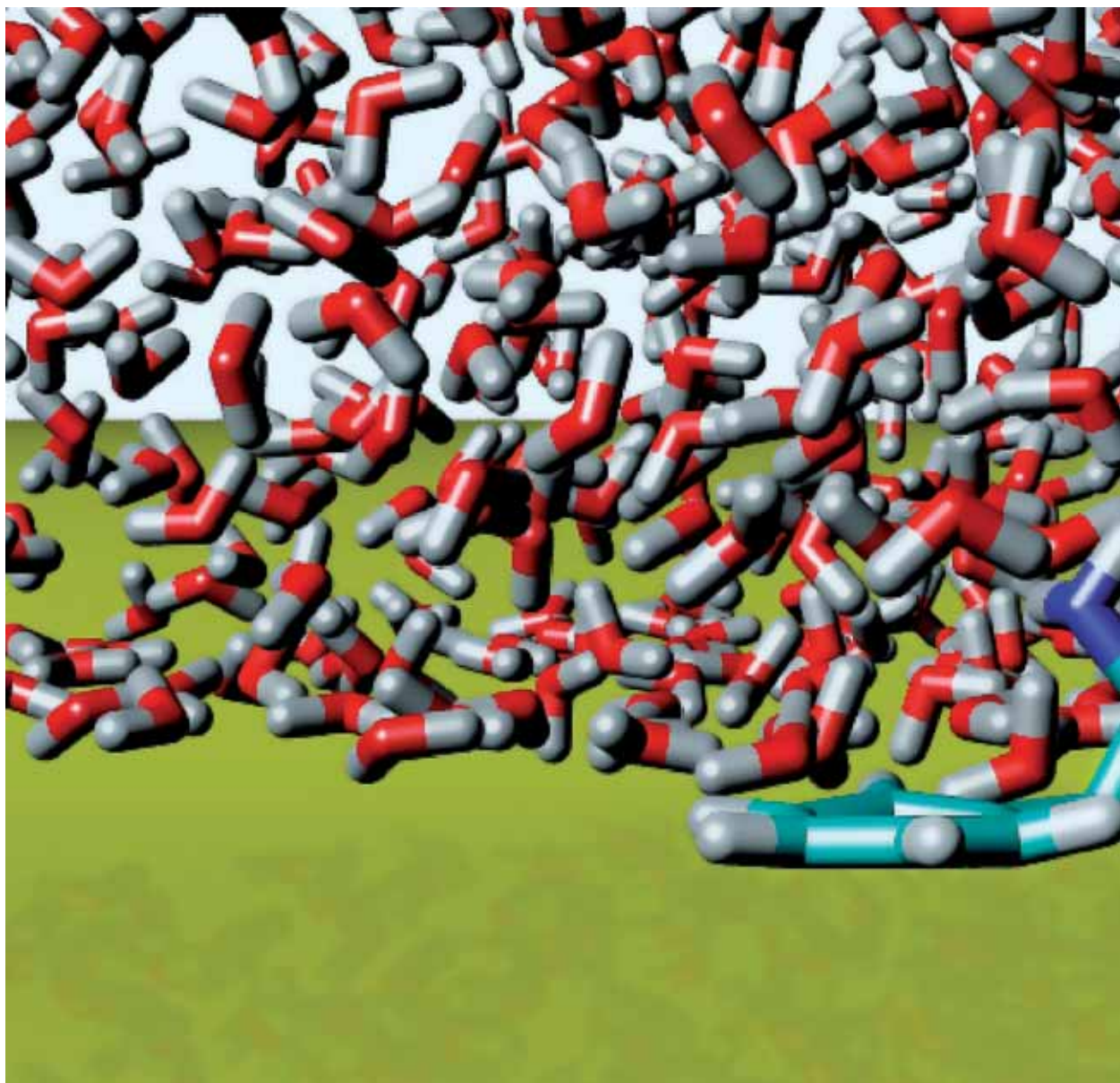


A NEW CHALLENGE EVERY DAY.™
Daily. Globally. Personally. Professionally.

P&G

Abbildung 3

Bringt man eine wässrige Aminosäure-Lösung an eine Oberfläche, so adsorbieren bestimmte Moleküle selektiv. Die Simulation zeigt, dass bei der Aminosäure Phenylalanin deren Phenylgruppe für die Anhaftung verantwortlich ist.



strukturen ordnen oder sogar ausfallen. Ähnliches gilt für Lösungen von Makromolekülen. Insbesondere wenn die komplexe Flüssigkeit starken Scherflüssen ausgesetzt ist, wie zum Beispiel in der Mikro- und Nanofluidik, können solche Effekte verstärkt und unvorhergesehen auftreten.

Ein weiteres Medium mit interner Struktur sind Polymerphasen. Polymere bilden an Grenzflächen, beispielsweise in Kompositmaterialien, so genannte Interphasen aus, in denen die Polymerstruktur stark von der eines Bulk-Polymeren abweicht. Interphasen können bis zu mehrere Mikrometer dick sein. Das heißt, die Polymerphase braucht mehrere Mikrometer, um ihre normale molekulare Struktur und ihr normales Materialverhalten zu erreichen. Molekulare Simulationen sind praktisch die einzige Methode, um die grenz-

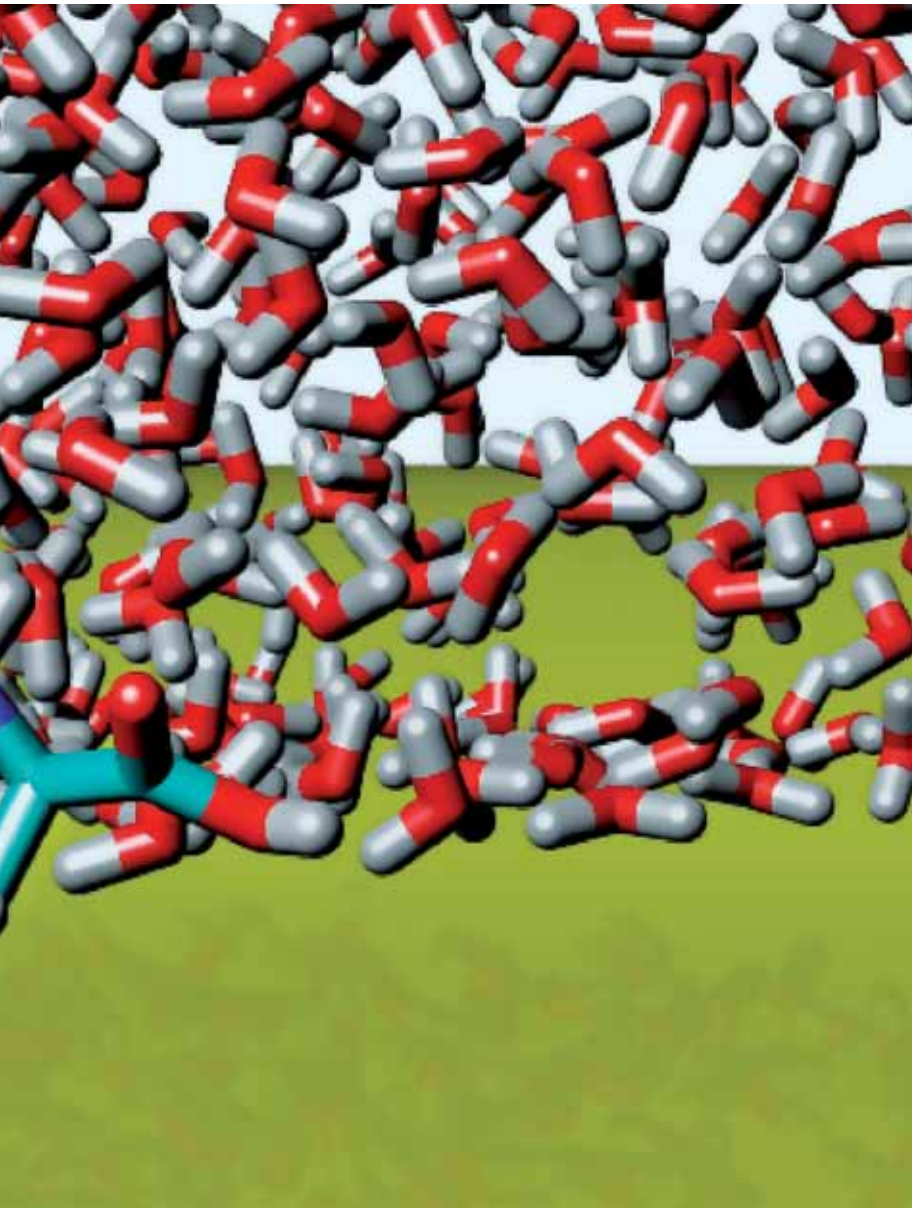
flächeninduzierten Veränderungen der Polymerstruktur direkt zu verfolgen. Wegen der Wichtigkeit von Polymer-Festkörper-Grenzflächen für technische Materialverbunde, von der traditionellen Klebverbindung bis hin zur organischen Photovoltaik, widmet sich dieser Thematik ein ganzer DFG-Schwerpunkt (1369 „Polymer-Festkörperkontakte“), der an der TU Darmstadt beheimatet ist.

- **Computational Methods**
Center of Smart Interfaces

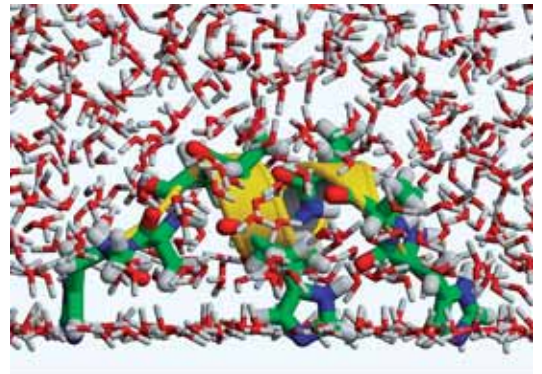
Prof. Dr. Nico van der Vegt
E-Mail: vandervegt@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de

- **Physikalische Chemie**

Prof. Dr. Florian Müller-Plathe
E-Mail: f.mueller-plathe@theo.chemie.tu-darmstadt.de
www.theo.chemie.tu-darmstadt.de

**Abbildung 4**

Polypeptide können aus Lösung selektiv an bestimmten Grenzflächen absorbieren. Ihre Aminosäuresequenz bestimmt dabei, in welcher Orientierung dies geschieht. Hier dreht das Peptid sich so, dass bevorzugt Histidin-Gruppen mit der festen Oberfläche in Kontakt treten.



Nico van der Vegt ist seit 2009 Professor für Computational Methods am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt und Mitglied des Fachbereichs Chemie.



Florian Müller-Plathe ist seit 2005 Professor für Theoretische Physikalische Chemie im Fachbereich Chemie der TU Darmstadt und einer der Principal Investigators des Center of Smart Interfaces.

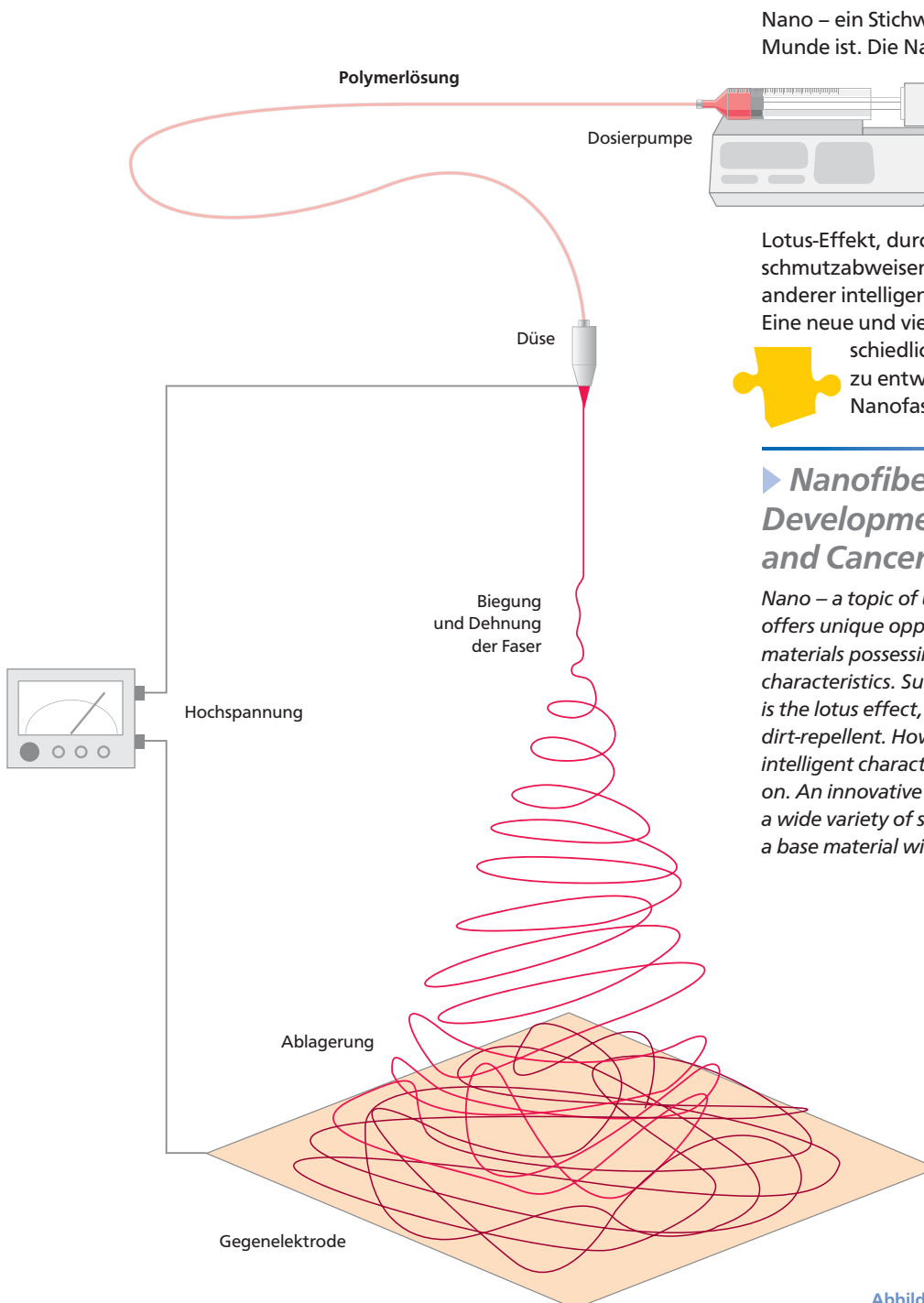
Biomoleküle an Grenzflächen

Die Wechselwirkung von biologischen Molekülen mit Grenzflächen ist von höchster Wichtigkeit in vielen Bereichen. In technischen Anwendungen möchte man die Wechselwirkung manchmal vermeiden, zum Beispiel die Abscheidung von Proteinen auf Rohr- und Membranoberflächen, das so genannte Fouling.

In anderen Zusammenhängen möchte man eine hohe Wechselwirkung zwischen synthetischem und biologischem Material erreichen, so zum Beispiel beim Einwachsen von medizinischen Implantaten. In der Natur gibt es schließlich viele Beispiele, bei denen die Evolution für eine perfekt abgestimmte Haftung auf Oberflächen gesorgt hat. Ein Beispiel sind die Proteine, die es Muscheln ermöglichen, unter Wasser auf praktisch jeder Oberfläche aufwach-

sen zu können. Die Wechselwirkungen von biologischen Molekülen hängen in starkem Maß von ihrer chemischen Struktur ab. Abbildung 4 zeigt ein kleines Peptid in Wasser, welches an einer Platin-Oberfläche haftet. Es tut dies nahezu ausschließlich mit den Imidazolresten seiner Histidindgruppen, die zudem in einer ganz charakteristischen Konformation auf die Oberfläche treffen. Durch Mutation von Aminogruppen, in der Natur oder im Labor, kann das Haftvermögen der Proteine bezüglich bestimmter Oberflächen genau gesteuert werden. Molekulare Simulationen sind das Werkzeug, um die Adsorption von Biomolekülen qualitativ und quantitativ, z.B. durch die Berechnung von freien Energien für Adsorptionsprozesse, zu charakterisieren, bzw. um alternative Proteine vorherzusagen und vorzuschlagen.

Nanofasern – was schnelle Computer und Krebsmedizin verbindet



Nano – ein Stichwort, das heutzutage in aller Munde ist. Die Nanotechnologie bietet einmalige

Möglichkeiten, Materialien mit ganz besonderen Oberflächen zu entwickeln und diesen vorteilhafte Eigenschaften zu verleihen. Das bekannteste Beispiel ist sicherlich der

Lotus-Effekt, durch welchen eine Oberfläche schmutzabweisend wird. Aber auch eine Vielzahl anderer intelligenter Fähigkeiten ist denkbar.

Eine neue und viel versprechende Methode, unterschiedlichste Oberflächeneigenschaften zu entwickeln, ist die Beschichtung mit Nanofasern und Carbon-Nanoröhrchen.



► Nanofibers: Relating the Development of Faster Computers and Cancer Treatment

Nano – a topic of universal interest. Nanotechnology offers unique opportunities to develop new materials possessing outstanding surface characteristics. Surely, the best-known example is the lotus effect, which makes a surface dirt-repellent. However, there is a multitude of further intelligent characteristics researchers are working on. An innovative and promising method to develop a wide variety of such surface properties is to coat a base material with nanofibers or carbon nanotubes.

Abbildung 1
Das Prinzip des
Elektrospinsens.

Alexander L. Yarin, Tatiana Gambaryan-Roisman und Clarissa Steffes • Nanofasern sind sehr feine Fäden aus Kunststoffen. In ihren Eigenschaften sind sie wahre Multitalente. Sie können nicht nur Flüssigkeiten aufsaugen und wieder abgeben, sondern auch für eine gute Kühlung der mit ihnen beschichteten Oberflächen sorgen. Diese unterschiedlichen Fähigkeiten machen sie zu einem interessanten Material, welches in den verschiedensten Anwendungsbereichen eingesetzt werden kann, beispielsweise in der Computerindustrie oder in der Bekämpfung von Krebs.

Elektrospinnen

Hergestellt werden Nanofasern wie auch Karbon-Nanoröhrchen durch Elektrospinnen (siehe Abb. 1). Das Basismaterial ist eine Lösung von Kunststoffen, in der Fachsprache auch Polymere genannt. Diese Polymerlösung wird dosiert einer Düse zugeführt. Zwischen der Düse und dem zu beschichtenden Gegenstand wird eine Hochspannung angelegt, so dass durch das elektrische Feld ein dünner Faden aus der Düse heraus- und zur Gegenseite hingezogen wird. Auf dem Weg beginnt der Faden sich zu verwirbeln, zunächst spiralförmig und später immer chaotischer. Dadurch wird er weit gedehnt und somit immer dünner, weniger als ein tausendstel Millimeter dünn. Schließlich lagern sich die Fasern völlig ungeordnet auf dem zu beschichtenden Gegenstand ab und bilden mit der Zeit eine Matte, welche umso dicker wird, je länger der Prozess andauert. Durch die Ablagerung der Fasern übereinander wird aber auch viel Luft in den Zwischenräumen eingeschlossen. Tatsächlich bestehen die Matten nur zu 10 % aus Polymer und zu 90 % aus Luft.

Durch die Verwendung von speziellen, ringförmigen Düsen können auch zwei verschiedene Polymerlösungen zusammen versponnen werden. Beim so genannten Ko-Elektrospinnen bildet eine Poly-

merart den Kern der Faser, während die andere wie eine Hülle um den Kern herumliegt. Durch spezielle Verfahren kann der Kern entfernt werden, so dass nur noch die Hülle als extrem dünnes, aber langes Röhrchen zurückbleibt. Mithilfe des Elektrospinnens können somit praktisch beliebige Bauteile mit Nanofasermatten beschichtet werden.

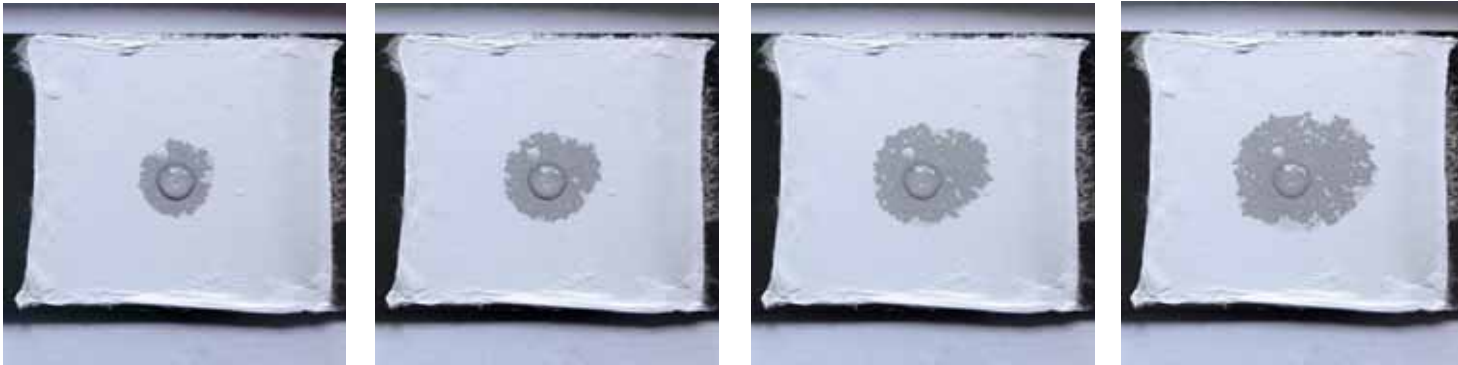
Schnellere Computer

Die Weiterentwicklung und Beschleunigung vieler elektronischer Komponenten wird im Moment dadurch gebremst, dass die Wärme, die diese Komponenten im Betrieb verursachen, nicht schnell genug abgeführt werden kann. Damit die Geräte nicht zu heiß werden, müssen folglich bessere Kühlstrategien gefunden werden. Eine besonders vielversprechende Strategie ist die Sprühkühlung, also das Besprühen der zu kühlenden Oberfläche mit Wasser, welches dabei verdampft. Im Idealfall verdampft jeder einzelne Tropfen möglichst schnell nach dem Auftreffen auf der Oberfläche. In der Praxis treten aber einige unerwünschte Effekte auf, so kann der Tropfen beispielsweise wie ein Gummiball von der Oberfläche zurückhüpfen. Dabei berührt er die Oberfläche nur kurz und kann sie demnach kaum kühlen. Bei einem weiteren Effekt, dem Leidenfrost-Effekt, berührt der Tropfen zwar zunächst die Oberfläche und verdampft dabei an der Unterseite, infolgedessen bildet sich aber eine Schicht aus Wasserdampf zwischen dem Tropfen und der Oberfläche. Im allgemeinen steigt dieser Wasserdampf allerdings nicht auf, so dass der Tropfen auf einem Kissen aus Wasserdampf schwimmt, welches wie eine Isolierung wirkt und ihn nicht an die Oberfläche heranlässt.

Mit einer Beschichtung aus Nanofasern lassen sich diese unerwünschten Effekte allerdings nahezu völlig vermeiden. Ein auftreffender Tropfen wird sofort von der Matte eingezogen, so dass er nicht mehr abprallen kann. Aus demselben Grund kann sich auch keine Wasserdampfschicht zwischen der Oberfläche und einem Tropfen bilden. Das Wasser hat immer guten Kontakt zum zu kühlenden Bauteil und verdampft auf diese Weise sehr viel schneller. Darüber hinaus bewirken die Fasern sogar eine enorme Steigerung der Kühleffizienz. In all den Zwischenräumen, in welchen vorher Luft eingeschlossen war, wird nun Wasser hineingezogen. Ähnlich wie in einem Blatt Löschpapier wird die

Nano

Die Vorsilbe nano leitet sich vom griechischen Wort für „Zwerg“ ab. In Mathematik und Technik bedeutet sie „ein Milliardstel“. Die Nanotechnologie beschäftigt sich mit Objekten, die einige Nanometer groß sind, also etwas mehr als 0,000 000 001m.



Feuchtigkeit eines einzelnen Tropfens dabei weit nach außen transportiert. Mit einem einzigen Tropfen kann so eine bemerkenswert große Fläche gekühlt werden, was wiederum ein Grund dafür ist, dass ein Tropfen sehr viel schneller und effektiver verdunstet. Mit einer Nanofaser-Beschichtung ist die Kühlleistung somit nicht nur höher, sondern sie wirkt auch über einen größeren Bereich als bei einem Bauteil ohne Beschichtung.

Krebsmedizin

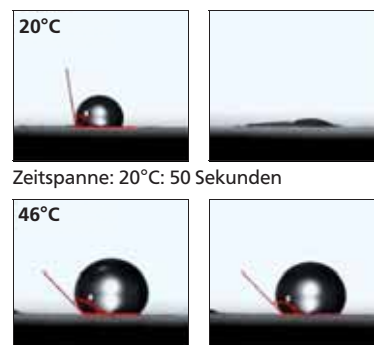
Neben ihren Eigenschaften, die Kühlung, also den Wärmetransport, zu verbessern, können Nanofasern auch zum Massentransport genutzt werden. Massentransport heißt hier, kleine Flüssigkeitsmengen von einem Ort zu einem anderen zu bewegen und erst dort kontrolliert wieder freizugeben. Genau diese Eigenschaft ist bei der Verabreichung von Krebsmedikamenten gefragt. Solche Medikamente sind sehr aggressiv, sie zerstören jegliche Zellen, auf die sie treffen, egal ob krank oder gesund. Daher ist man natürlich bestrebt, diese Medikamente nur auf krankes Gewebe zu applizieren, ohne auf dem Weg dorthin zu vielen anderen Zellen zu schaden.

Hierfür bieten Nanofasermatten eine exzellente Grundlage. In ihren vielen Hohlräumen können sie genügend flüssige Medikamente aufnehmen und diese auch innerhalb des Körpers unter Verschluss halten, so dass keine unnötige Zerstörung von gesundem Gewebe auftritt. Für die kontrollierte Abgabe des Medikamentes an der geforderten Stelle kann auf einen Trick zurückgegriffen werden. Werden beim Elektrospleinprozess bestimmte Polymere, wie z.B. das so genannte PNIPAM zugegeben, so werden der Fasermatte besondere Eigenschaften

Große Wirkung von kleinsten Strukturen

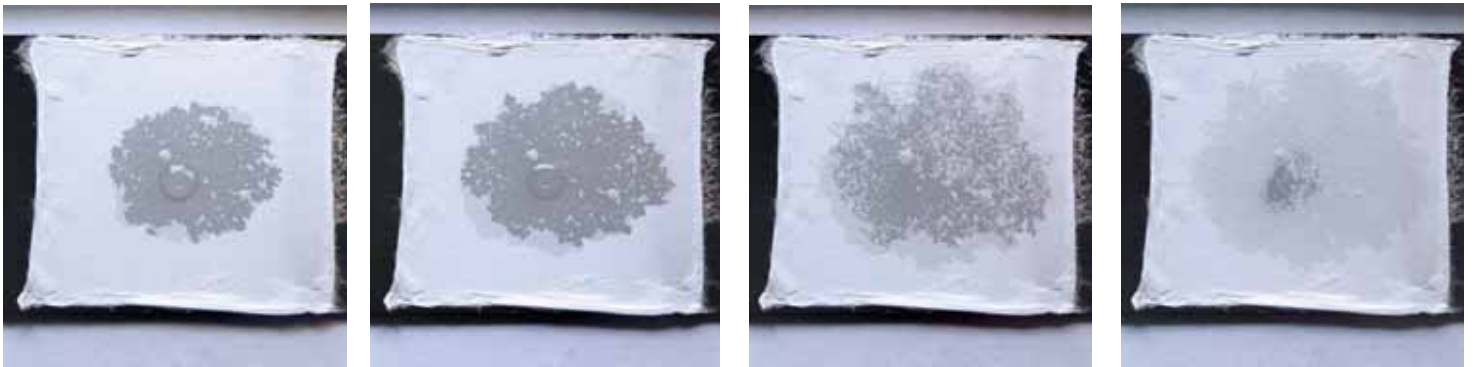
In der Nanotechnologie spielen oft winzige Änderungen in den chemischen Verbindungen eine Rolle. Diese Änderungen können z.B. durch Variation der Temperatur oder des pH-Werts, der ein Maß für die Säurehaltigkeit einer Flüssigkeit darstellt, hervorgerufen werden. Nach außen hin kann dies wiederum eine völlige Wandlung der erfahrbaren Eigenschaften bewirken. So nimmt eine PNIPAM-Nanofasermatte bei Raumtemperatur einen Wassertropfen innerhalb von ca. 50 Sekunden auf. Bei etwa 32°C ändert sich ihr Verhalten schlagartig. Wird die Matte beispielsweise auf 46°C erhitzt, sitzt der Tropfen auch nach 3 Minuten noch fast unverändert auf der Oberfläche (Abbildung 2).

Abbildung 2
Änderung der Eigenschaften einer PNIPAM-Nanofasermatte.



Zeitspanne: 20°C: 50 Sekunden

46°C: 3 Minuten

**Abbildung 3**

Ein einzelner Wassertropfen wird von einer Nanofaserbeschichtung aufgesogen und verdunstet innerhalb kurzer Zeit.

verliehen. Unterhalb eines gewissen Temperaturpunktes verhält sich die Matte hydrophil, zu Deutsch Wasser liebend. Sie saugt folglich jegliche Flüssigkeit innerhalb von kurzer Zeit auf. Oberhalb dieser Temperatur kehrt sich ihr Verhalten ins hydrophobe, also Wasser hassende, um. Es wird nun keine Flüssigkeit mehr aufgenommen bzw. bereits aufgenommene Flüssigkeit wird aus der Matte ausgestoßen. Genau dies würde auch bei Tumoren geschehen. Krankes Gewebe unterscheidet sich von gesundem unter anderem durch eine erhöhte Temperatur. Auf diese Weise würden die Medikamente tatsächlich nur dorthin gelangen, wo sie ihre Wirkung entfalten sollen.

Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes ist das Befüllen von Karbon-Nanoröhrchen mit Medikamenten. Anschließend werden diese an den Enden mit einem PNIPAM-haltigen Stoff verschlossen. In den Röhrchen ist die Medizin noch besser verpackt und wird nach dem gleichen Prinzip wie dem der Faser-matten wieder freigegeben.

Obwohl aus denselben Stoffen mit demselben Verfahren hergestellt, können Nanofasermatten somit in völlig unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden. Sie sind vielseitige Verwandlungskünstler und bieten ein großes Potential zur Weiterentwicklung. Eine solche Vielfalt der Anwendungsbereiche ist ein typisches Beispiel für die Nanotechnologie und damit sicherlich auch ein Grund, warum ihre Bedeutung für viele Leute sehr viel schwerer zu fassen ist als z.B. die der Automobiltechnologie. Zu optimierende Oberflächen finden sich überall im Alltag, weshalb wir solchen Technologien sicherlich noch oft, wahrscheinlich meistens unbewusst, begegnen werden.

- **Micro/Nanoscale Fluid Transport Laboratory**
University of Illinois at Chicago

Prof. Alexander L. Yarin,
Tel.: +1 312/996-3472
E-Mail: ayarin@uic.edu
www.uic.edu/labs/MNFTL/

- **Fachgebiet für Technische Thermodynamik**

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Tatiana Gambaryan-Roisman,
Tel.: 06151/16-70361
E-Mail: gatiana@ttd.tu-darmstadt.de
www.ttd.tu-darmstadt.de/

- **Center of Smart Interfaces**

Dipl.-Ing. Clarissa Steffes,
Tel.: 06151/16-6606
E-Mail: steffes@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de/



Alexander L. Yarin ist Professor an der University of Illinois at Chicago und Fellow am Center of Smart Interfaces in Darmstadt. Elektrosinnen ist seit vielen Jahren Bestandteil seiner Forschungen.



Tatiana Gambaryan-Roisman leitet eine Emmy-Noether-Forschungsgruppe, welche am Fachgebiet Thermodynamik des Fachbereichs Maschinenbau angesiedelt ist, und ist als Principal Investigator am CSI beteiligt.



Clarissa Steffes ist Doktorandin am Center of Smart Interfaces und beschäftigt sich mit Wärmetransport und Strömungen durch poröse Medien.

Funktionale Oberflächen

– mikroskopische Tausendsassas

Nicht nur der Weltraum, sondern auch die unendlichen Weiten des Mikrokosmos halten für die Wissenschaft spannende Erkenntnisse bereit. Dank des technischen Fortschritts eröffnen sich heute sowohl mess- als auch fertigungstechnisch die Möglichkeiten, in Größenordnungen vorzudringen, die dem bloßen menschlichen Auge schon lange nicht mehr zugänglich sind. Mikrostrukturen, die fluidmechanisch



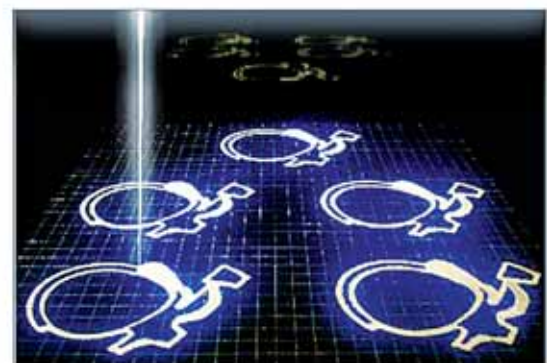
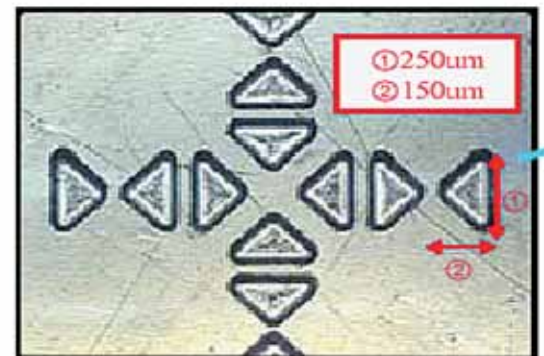
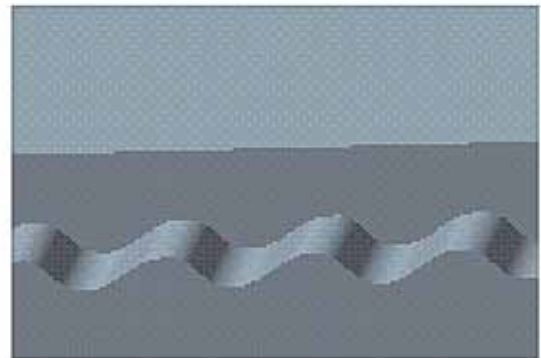
oder thermodynamisch Einfluss auf das Makrogeschehen in ihrem unmittelbaren Umfeld nehmen, stehen im Fokus der Forschungsarbeiten, die der folgende Artikel beschreibt.

► Smart Interfaces – Microscopic Polymaths

Not only space but also the last frontier, the microcosmos, holds exciting findings in store for sciences. Thanks to the technical progress new possibilities of measuring and production open up nowadays, which allow entering dimensions no longer accessible to the naked human eye. Microstructures that exert fluid mechanic or thermo dynamic influence on the macro-ongoings in the nearest surrounding, are in the focus of the research the following article is describing.

Eberhard Abele, Benjamin Fröhlich, Peter Groche und Cécile Müller • Innerhalb der verschiedenen Forschungsschwerpunkte des CSI besteht ein wachsender Bedarf an präzisionsgefertigten Bauteilen für unterschiedlichste Einsatzzwecke. Das Bauteilpektrum ist hierbei breit gefächert und erstreckt sich von einfachen Modellen oder Prototypen über offene und geschlossene (Mikro-) Fluidkanäle bis hin zu hinterschnittigen Geometrien mit überlagerten Rillenprofilen, vgl. Abbildung 1.

Die Bauteile werden in verschiedenen Materialien benötigt (z.B. Polyacryl, Messing, Werkzeugstahl, etc.) und müssen z.T. in höchster Genauigkeit erstellt werden, was die Grenzen der bislang bestehenden produktionstechnischen Infrastruktur innerhalb des Clusters überschreitet. Das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) erweitert daher seine fertigungstechnischen Möglichkeiten (u.a. Hochgeschwindigkeitsfräszentren mit CAD/CAM-Kopplung, taktile und optische Fertigungsmesstechnik), um die hohen Anforderungen bzgl. geometrischer Komplexität und Präzision erfüllen zu können. Ein Ultrapräzisions-Bearbeitungszentrum wird die



spannende Bearbeitung kleinster Strukturen in verschiedenen Materialien unterstützen (beispielsweise Fluidkanäle mit einer Tiefe von $5\ \mu\text{m}$ bei einer Breite von $10\ \mu\text{m}$). Eine Anlage zum Direkten Metall-Laser-Sintern ermöglicht die Herstellung komplexer Hinterschnittgeometrien mit definierter Oberflächenstruktur.

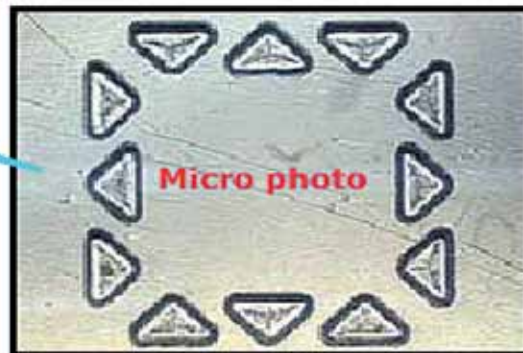
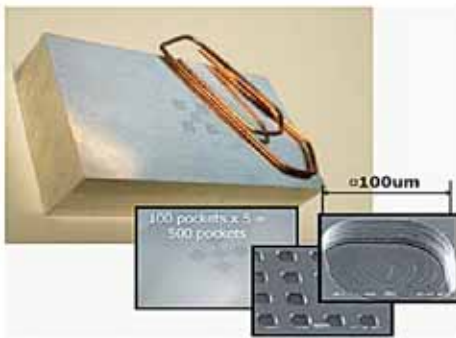
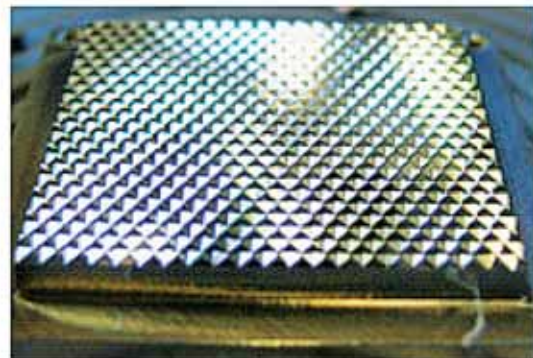
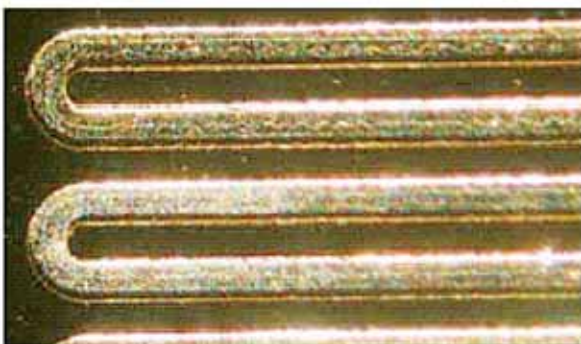


Abbildung 1
Vielfalt des
Teilebedarfs
innerhalb CSI.

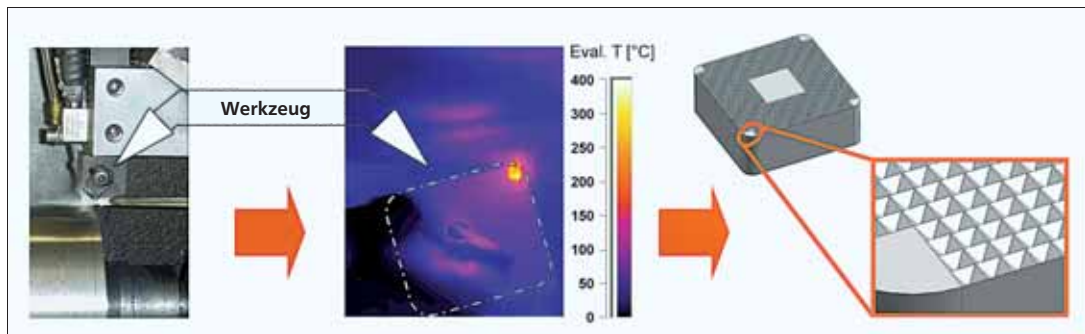


Die Forschungsaktivitäten im Mikro Prototyping Zentrum (MPZ) fokussieren momentan auf geeignete Prozessparameter, Maschineneinstellungen und Werkzeuge, um für den jeweiligen Anwendungsfall (abhängig von Material, Geometriemerkmale, Oberflächenstruktur, etc.) eine geeignete Fertigungsstrategie zu erarbeiten.

Der wachsende Bedarf an prototypisch gefertigten Bauteilen kann mithilfe der erweiterten fertigungs- und messtechnischen Infrastruktur somit auch im unteren Mikrometerbereich der Größenskala abgedeckt werden, um die PIs mit allen erforderlichen Bauteilen versorgen zu können. Neben der Prototypenfertigung besteht auch im Bereich der Zer-

Abbildung 2

Optimierung des Wärmeübergangs durch Modifikation der Werkzeugoberfläche: Messung der Zerspanntemperatur beim Drehen (Mitte), modifizierte Werkzeugoberfläche (rechts).



spanungstechnologie selbst ein Bedarf an „smart interfaces“. So wird die Produktivität eines Zerspanprozesses in hohem Maße vom Wärmeübergang zwischen Werkzeug, Span und Werkstück bestimmt, welcher wiederum vom Werkstoff und der Oberflächenfeingestalt des Werkzeugs abhängt. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit, Härte und Leistungsfähigkeit des Schneidstoffs polykristalliner Diamant (PKD) wird für derartige Werkzeuge eine Optimierung der Schneidstoffoberfläche durchgeführt. Die aus den Eigenschaften resultierende hohe Verschleißresistenz von PKD ermöglicht eine Standzeitverbesserung bei gleichzeitiger Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit und dadurch der Produktivität. Die geringe thermische Stabilität und die hohe chemische Affinität von PKD zu eisenhaltigen Werkstoffen beschränken das Einsatzgebiet jedoch auf die Zerspannung von Nichteisenmetallen, (faserverstärkten) Kunststoffen sowie Holz und Gestein. Ziel innerhalb eines Teilprojektes des CSI im Bereich „Heat Transfer Enhancement“ ist es, die hochproduktive Bearbeitung mit PKD-Werkzeugen auf Gusseisenwerkstoffe erweitern zu können. Bei erhöhten Temperaturen kommt es durch die ther-

mische Instabilität des PKD zu einer Rückwandlung der Diamantstruktur in eine Grafitstruktur, wodurch Härte und Verschleißresistenz des PKD-Schneidstoffs verloren sind. Dieser Vorgang ist als katalytische Grafitisierung bekannt. Eine deutliche Herabsetzung der Temperatur in der Zerspanzone verbunden mit einer sauerstoffarmen Atmosphäre ermöglicht es dennoch, Gusseisen und Stahl mit Diamant zu bearbeiten.

Entsprechende Versuchsergebnisse liegen bereits am PTW vor. In Abhängigkeit der thermodynamischen Kennwerte des Werkstoffs, des verwendeten Kühlschmiermittels und des Schneidstoffs erfolgt eine Prognose der Zerspanntemperatur in der Spanbildungszone. Zur Modellierung der thermodynamischen Zusammenhänge in der Spanbildungszone und der Untersuchung des Einflusses verschiedener Kühlschmierstrategien ist die messtechnische Erfassung der Zerspanntemperatur in praktischen Versuchen unerlässlich. Zur sukzessiven Optimierung des Wärmeübergangs wird der Fokus auf die optimale Gestaltung der Schneidstoffoberfläche gelegt. Ziel ist es, durch eine Modifikation der Spanfläche die zur Wärmeübertragung verfügbare Oberfläche zu vergrößern. Dies kann beispielsweise durch eine Oberfläche mit definierter Rauigkeit oder eine pyramidale Struktur, welche durch Laserabtragen an einer Wendschneidplatte erzeugt wird, erreicht werden. So kann die bei der Zerspannung entstehende Wärme schneller aus der Zerspanzone abgeführt und die katalytische Grafitisierung verhindert werden.

Die Werkzeuge werden parallel dazu in Standzeitversuchen an verschiedenen Gusseisenwerkstoffen getestet und die vorliegenden Verschleißmechanismen und Zerspanntemperaturen analysiert.

- **Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)**

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Tel.: 06151/16-2156
E-Mail: abele@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de

- **Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU)**

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Tel.: 06151/16-3056
E-Mail: groche@ptu.tu-darmstadt.de
www.ptu.tu-darmstadt.de

Gut, dass es **Menschen wie Sie** gibt. Und KSB.

Ohne die Pumpen, Armaturen und Systeme von KSB könnten unsere rund 14.000 Mitarbeiter die Welt nur schwer in Bewegung halten. Unsere anspruchsvollen Technologien sind es, die jede Flüssigkeit dorthin bringen, wo sie benötigt wird. Vom Heizwasser in der Gebäudetechnik bis hin zum Kühlwasser in riesigen Kraftwerken: Unsere Ideen sind in allen Anwendungsbereichen gefragt. Ihre bald auch?

Das ist Ihre Chance, bei einem Global Player mit kollegialer Atmosphäre Ihre Karriere in Fluss zu bringen. Denn bei KSB können sich Studenten und Hochschulabsolventen Tropfen für Tropfen in spannende Aufgaben einbringen.

www.ksb.com

Tobias Konrad,
Trainee



Diana Höning,
Unternehmens-
kommunikation

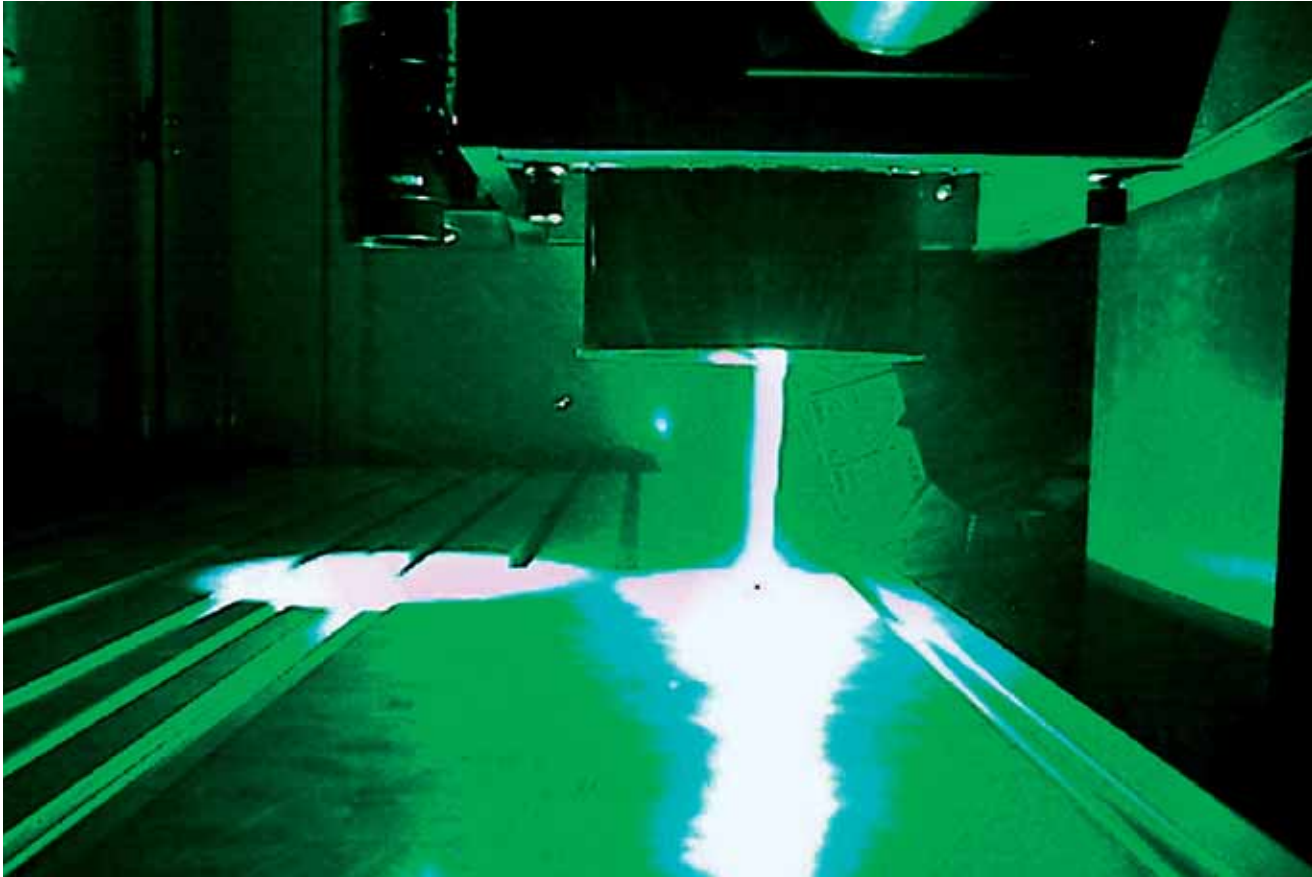
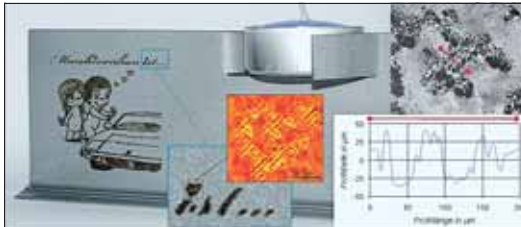


Abbildung 3
Laserstrukturierung

Abbildung 4
Lasergravierter
Kerzenhalter. Ergebnis
der Profilmessung an
der Herzform mittels
Spezialmikroskop.



Schließlich kann die optimale „smart interface“, die dem extremen mechanischen, thermischen und chemischen Belastungskollektiv am längsten Stand hält, definiert werden.

Ein weiterer Aspekt intelligenter Grenzflächen ist die Interaktion solider Strukturen mit Fluiden. Weist die Oberfläche eines Körpers Mikrogeometrien auf, können diese das Benetzungsverhalten oder die Reibverhältnisse maßgeblich beeinflussen. Die bekanntesten Phänomene diesbezüglich sind die in der Natur auftretenden Lotus- oder Haihaut-Effekte. Mikrorillen auf den Hautschuppen des Hais bewirken, dass sich beim Schwimmen dicht am Körper eine laminare Strömung ausbildet und sich so der Strömungswiderstand und damit die Reibung vermindern. Diesen Effekt versucht man heute im Flugzeug-, Fahrzeug- und Schiffsbau auszunutzen. Auch andere technische Bereiche profitieren von den Vor-

teilen. Es zeigte sich in den vergangenen Jahren beispielsweise, dass mikrostrukturierte metallische Oberflächen oftmals günstige Eigenschaften bei der spanlosen Fertigung von Umformteilen bieten. Gerade in der Umformtechnik sind die Bauteile extrem hohen Belastungen ausgesetzt. Die Kraftübertragung vom Werkzeug auf das Bauteil läuft größtenteils über den Schmierstofffilm. An Kontaktstellen, an denen das Öl in Taschen eingeschlossen wird, bilden sich hydrostatische Druckpolster, die eine Stützfunktion erfüllen. Kann der Schmierstoff in offenen Bereichen heraus fließen, beeinflussen hydrodynamische Effekte den Umformvorgang, da das Werkzeug ähnlich wie beim Aquaplaning aufschwimmt.

Spezial Laser zur Mikrobearbeitung

Das CSI verfügt unter anderem über eine Festkörper-Lasereinheit mit einer Wellenlänge von 532 nm, einer Leistungsspitze von 22 kW bei 30 kHz Impulsbetrieb und einer Wiederholrate von bis zu 100 kHz. Mit der hochdynamischen Scanneroptik können Freiformflächen, rotationssymmetrische Bauteile und große Werkstücke bis zu 1.000 mm Länge zügig bearbeitet werden. Damit ist die Gestaltung diverser Oberflächenmorphologien möglich.

Das Einbringen von Mikrokanälen oder -Taschen kann alternativ zu Zerspanungsvorgängen auch mittels Laserabtragen erfolgen. Dem CSI steht hierzu ein Laserbearbeitungszentrum zur Verfügung, das die Erzeugung minimaler Strukturen (bis zu $0,5\ \mu\text{m}$ tief und $5\ \mu\text{m}$ breit) in nahezu jeden Werkstoff, wie z. B. Kunststoff, Metall, Diamant oder Keramik ermöglicht (vgl. Abbildung 3). Exemplarisch stellt Abbildung 4 eine lasergravierte Grafik dar, die sich, wie die Mikroskopaufnahmen zeigen, aus Mikrokanälen zusammensetzt. Die Profilmessung ergibt eine Kanalbreite von etwa $40\ \mu\text{m}$ bei einer durchschnittlichen Tiefe von $30\ \mu\text{m}$. Zur Sicherstellung einer zielgerichteten Ausbildung der funktionalen Feingestalt ist ein detailliertes Wissen über die Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Systempartnern notwendig. Die Deformationsvorgänge unter mechanischer Belastung, die Auswirkungen komplexer Adhäsionsinflüsse bei Festkörperkontakt sowie die Strömungsmechanismen bei Fluid-Struktur-Interaktionen zu ergründen ist eine Herausforderung, der sich das Center of Smart Interfaces an der TU Darmstadt stellt.



Eberhard Abele ist Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen an der TU Darmstadt und und Principal Investigator am CSI.



Peter Groche ist Leiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen an der TU Darmstadt und Principal Investigator am CSI.



Benjamin Fröhlich ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut von Prof. Abele und Leiter des Mikro Prototyping Zentrums.



Cécile Müller untersucht als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut von Prof. Groche das Reibverhalten mikrostrukturierter Blechoberflächen.

ANZEIGE

Brüel & Kjær Vibro GmbH



Brüel & Kjær Vibro

Brüel & Kjær Vibro GmbH
Leydheckerstraße 10
64293 Darmstadt
Deutschland
Tel.: +49 (0) 6151 4 28 11 00
Fax: +49 (0) 6151 4 28 12 00
info@bkvibro.de
www.bkvibro.com

Zentrales Vertriebsbüro
Sibyllastraße 9
45136 Essen
Tel.: +49 (0) 201 8 94 32 90
Fax: +49 (0) 201 8 94 32 92
www.bkvibro.de

Condition Monitoring

- Schwingungsmesstechnik
- Wälzlagerüberwachung
- Betriebswuchten
- Konventionelle und diagnostische Maschinenüberwachung
- Schwingungsdiagnose als Dienstleistung
- Beratung, Engineering, Inbetriebnahme
- Schulung und Seminare



www.bkvibro.de

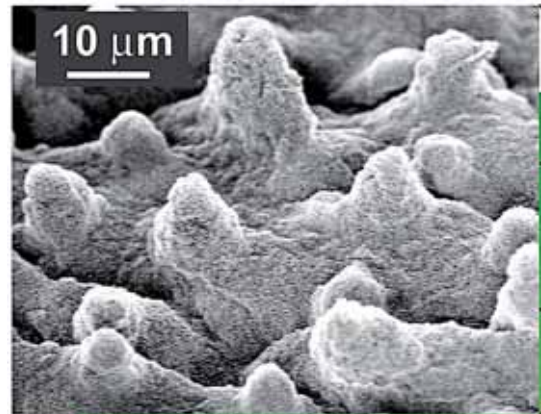
Smart Interfaces

– superhydrophobe Oberflächen

Superhydrophobe, selbstreinigende Oberflächen sind erstrebenswert für eine Vielzahl industrieller Prozesse. Superhydrophobizität beruht auf einer Rauigkeit auf unterschiedlichen Längenskalen. Mikrometer- und nanometergroße Strukturen modifizieren sowohl den Kontaktwinkel ruhender wie das Strömungsverhalten sich ausbreitender Tropfen. Idealerweise sollten superhydrophobe Oberflächen einfach herstellbar,



kratzbeständig und langzeitstabil sein. Keine der existierenden Techniken erfüllt alle diese Anforderungen. Unsere „himbeerförmigen“ Polymer-Silica-Hybridteilchen ermöglichen, langzeitstabile superhydrophobe Oberflächen einfach herzustellen.



► Smart Interfaces – Superhydrophobic Surfaces

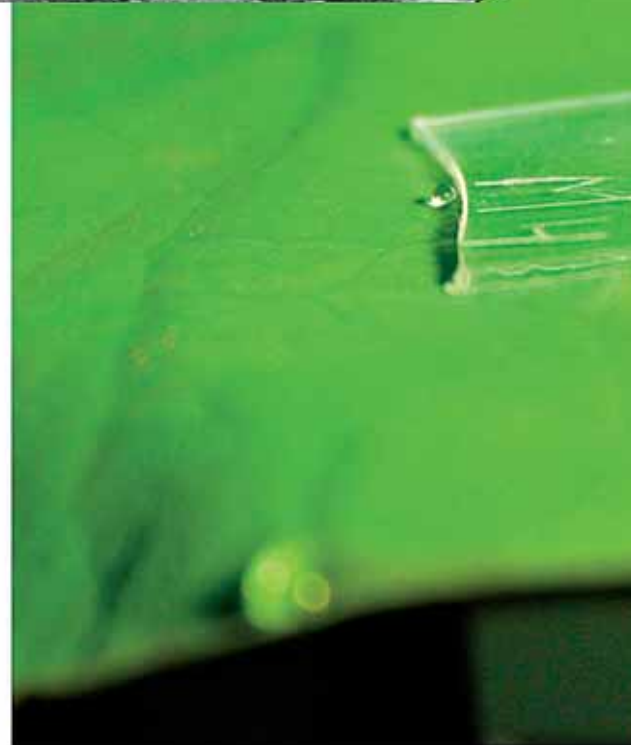
Superhydrophobic, self-cleaning coatings are advantageous for convenient and cost-effective maintenance of a variety of surfaces. The peculiarity of such surfaces is that micro and nano-size structures can significantly affect the contact angle of resting droplets and the hydrodynamics of liquid spreading. Both are vital for a wide variety of industrial applications. Ideally, such coatings should be easy to make and apply, mechanically resistant, and long-term stable. None of the existing methods have yet mastered the challenge of meeting all three criteria. We went one step further in making mechanically stable superhydrophobic surfaces using hybrid “raspberry-like” core-shell particles.

Ilia Roisman / Andreas Lembach / Doris Vollmer und Hans-Jürgen Butt • Als „hydrophob“ bezeichnet man wasserabweisende Oberflächen. Geht die Antipathie so weit, dass Wassertropfen leicht abperlen und dabei auch noch Schmutzpartikel mit entfernen, spricht man von superhydrophoben Oberflächen. Das wohl bekannteste Beispiel bildet die Oberfläche eines Lotusblatts.

Superhydrophobe Oberflächen stehen schon seit mehr als zehn Jahren im Zentrum der Forschung. Es gibt auch bereits erste Produkte zu kaufen, die Häuserwände und Autoscheiben in selbstreinigende Oberflächen verwandeln. Weitere mögliche Anwendungen sind selbstreinigende medizinische Gegenstände, an denen Bakterien keinen Halt finden oder Behälter für wertvolle medizinische Wirkstoffe, die sich bis auf den letzten Tropfen leeren lassen. In der Photovoltaik führt die Verschmutzung der Anlagen zur Verringerung der Effizienz; notwendige Reinigungen könnten bei superhydrophober Beschichtung entfallen oder zumindest in längeren Ab-

ständen erfolgen. Beim Transport wässriger Flüssigkeiten ließe sich der Fließwiderstand und damit der Energieaufwand verringern, wenn man die Innenwände der Rohre superhydrophob beschichtet. Bisher werden all diese Anwendungen jedoch durch die geringe Kratzfestigkeit und Langzeitstabilität der Beschichtung eingeschränkt.

Intuitiv erwarten vielen Menschen, dass superhydrophobe Oberflächen extrem glatt sind und alles von ihnen abrutscht. Bei genauer Betrachtung



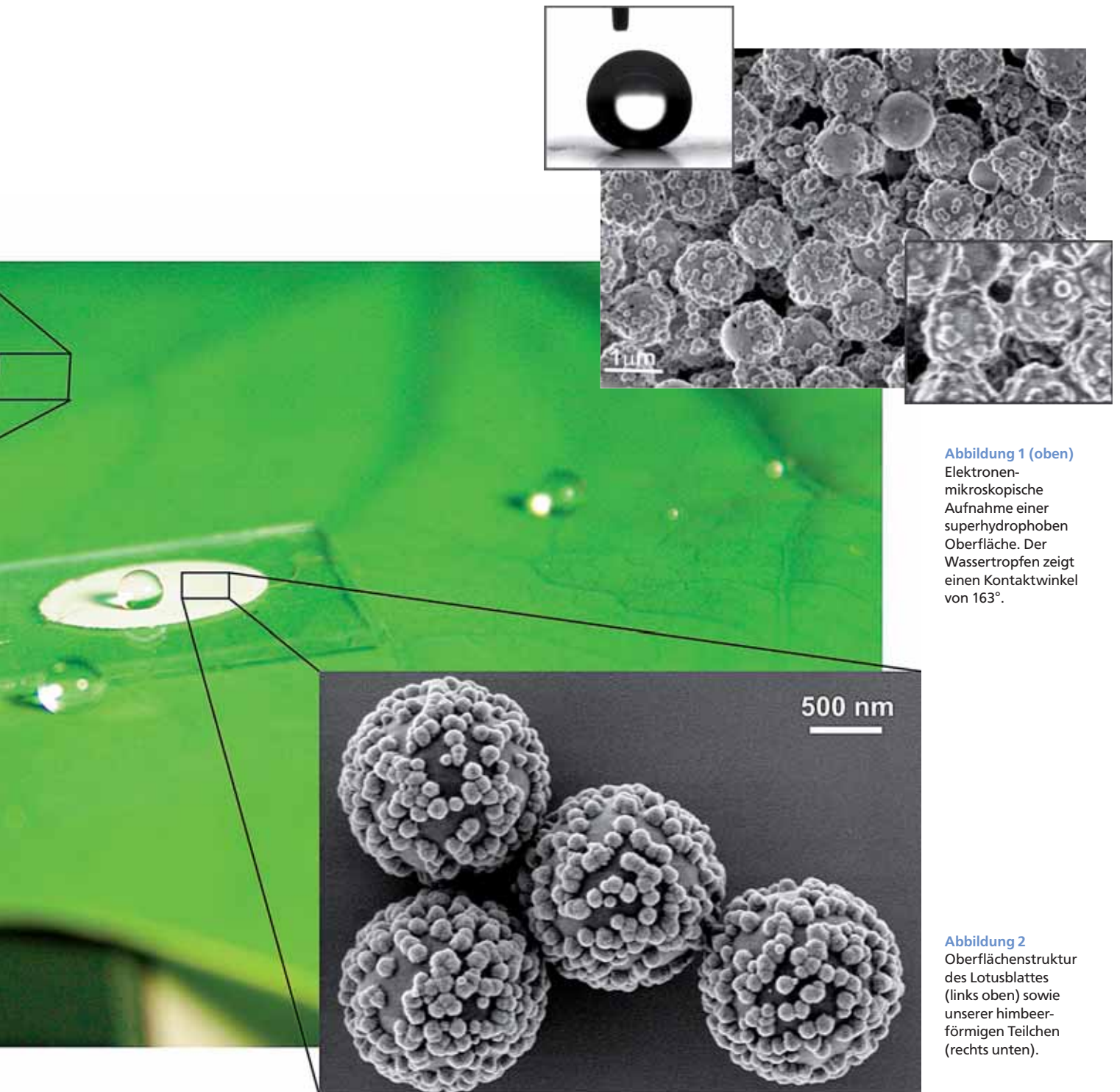


Abbildung 1 (oben)
Elektronen-
mikroskopische
Aufnahme einer
superhydrophoben
Oberfläche. Der
Wassertropfen zeigt
einen Kontaktwinkel
von 163°.

Abbildung 2
Oberflächenstruktur
des Lotusblattes
(links oben) sowie
unserer himbeer-
förmigen Teilchen
(rechts unten).

tung ist das Lotusblatt aber genau das Gegenteil: auf der Mikrometer-Skala ist es sehr rau (Abbildung 2). Man kann sich dies veranschaulichen, indem man einen Tropfen entsprechend vergrößert betrachtet. Er entspräche dann einer – im Vergleich zu der Mikrostruktur auf dem Lotusblatt – riesigen Kugel. Die Spitzen auf dem Lotusblatt bieten der Kugel keine Möglichkeit festzuhängen. Die Kontaktfläche ist minimiert. So kann der Tropfen, einmal ins Rollen gekommen, nicht anhalten und fällt am Ende des

Blattes runter. Neben der Struktur auf der Mikrometer-Skala muss das Material, aus dem die Oberfläche beschaffen ist, bereits wasserabweisend sein. Erst beide Faktoren zusammen führen zur Superhydrophobizität.

Abperlende Tropfen

Generell bezeichnet man eine Oberfläche als hydrophob, wenn ein Wassertropfen einen Kontaktwinkel von mehr als 90° bildet. Die Hydrophobizität

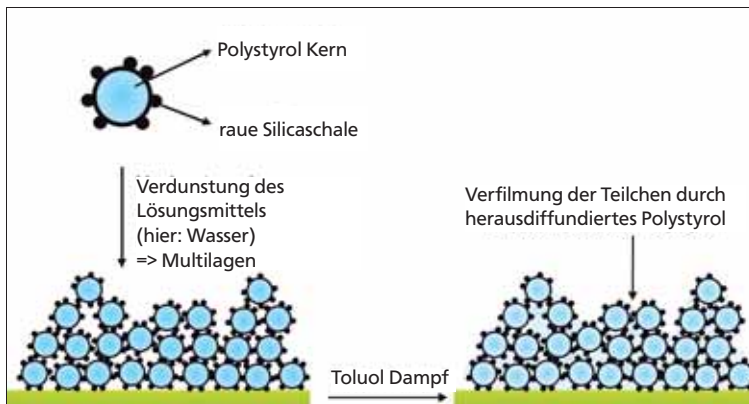


Abbildung 3
Herstellung superhydrophober Oberflächen mittels hybrider Himbeerteilchen.

hängt sowohl von der chemischen Zusammensetzung wie von der Rauigkeit der Oberfläche ab. Glatte hydrophobe Oberflächen können Kontaktwinkel von bis zu 120° aufweisen. Um den Kontaktwinkel weiter zu erhöhen, muss die Oberfläche auf einer Längenskala von bis zu $10\ \mu\text{m}$ aufgeraut werden. Dadurch kann der Kontaktwinkel auf 170° erhöht werden. In dem Fall bildet der Tropfen praktisch eine Kugel.

Für die selbstreinigende Wirkung einer superhydrophoben Oberfläche ist aber nicht nur der Kontaktwinkel wichtig. Entscheidend ist außerdem, ob der Tropfen auf der Oberflächen leicht abrollt oder haften bleibt. Um dies zu quantifizieren, unterscheidet man zwischen dem Fortschreitkontaktwinkel (engl. advancing contact angle) und dem Rückzugskontaktwinkel (receding contact angle). Der Fortschreitkontaktwinkel misst den Winkel zwischen Tropfen und Substrat gerade bevor sich der Tropfen weiter ausbreitet. Der Rückzugskontaktwinkel charakterisiert den Tropfen kurz vor dem Rückzug der Kontaktlinie. Die Differenz zwischen beiden Werten wird auch „Kontaktwinkelhysterese“ oder kurz „Hysterese“ genannt. Je größer die Hysterese, desto schwieriger lässt sich ein Tropfen auf der Ober-

fläche verschieben. Damit ein Tropfen daher leicht abperlt, muss die Hysterese klein sein.

Bei superhydrophoben Oberflächen wird die geringe Hysterese dadurch erreicht, dass die Anzahl möglicher Haftstellen minimiert ist, so dass der fortschreitende und zurückziehende Kontaktwinkel nahezu identisch sind. Die Flüssigkeit dringt nicht weiter zwischen die mikroskopischen Ausstülpungen, da die Oberfläche an sich bereits hydrophob ist. Der Tropfen ruht ebenfalls auf den vom Substrat eingeschlossenen Luftpolstern.

Von der Natur lernen:

Himbeerartige superhydrophobe Oberflächen

Um dem Ziel nach einfach herstellbaren, kratzfesten und langzeitstabilen Oberflächen einen Schritt näher zu kommen, haben wir eine neue, einfache Synthese entwickelt. Mittels Emulsionspolymerisation wurden $1\ \mu\text{m}$ große runde Polystyrol Kolloide synthetisiert, auf denen wir ca. $100\ \text{nm}$ große Silica (SiO_2) Partikel aufwachsen lassen. Die Partikel haben eine himbeerartige Struktur. Um eine hinreichende Stabilität dieser himbeerartigen Teilchen zu erhalten, ummanteln wir sie mit einer $20\text{--}40\ \text{nm}$ dicken Silicaschicht. Die Dicke ist dabei so gewählt, dass sie einerseits eine Zunahme der mechanischen Stabilität des einzelnen Teilchens bewirkt, andererseits aber hinreichend porös ist, so dass das im Kern eingeschlossene Polystyrol langsam heraus diffundieren kann.

Die noch hydrophilen „Himbeerteilchen“ lassen sich im Wasser dispergieren, sedimentieren jedoch innerhalb von Minuten. Nach Verdunsten des Wassers setzen wir die Himbeerteilchen der Dampfphase eines guten Lösungsmittels für Polystyrol aus z.B. Toluol. Alternativ kann der Dispersion etwas Cyclohexan zugesetzt werden, so dass schon während des Eintrocknens Polystyrol aus den Teilchen diffundiert. Beides bewirkt eine Verfilmung der Polystyrol-Silica Multischichten (Abb. 3). Die zwar raue, aber noch hydrophile Oberfläche setzen wir der Gasphase eines flüchtigen Fluorsilans aus, was die Oberfläche in eine superhydrophobe Oberfläche verwandelt. Sie zeigt Kontaktwinkel von bis zu 163° und eine Hysterese von nur $1^\circ\text{--}5^\circ$ (Abbildung 1).

Tropfenaufprall

Faszinierend ist zu beobachten, wenn ein Tropfen mit hoher Geschwindigkeit (einige m/s) auf diese

- **Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik**

Ilija Roisman,
Tel.: 06151/16-3929
E-Mail: roisman@sla.tu-darmstadt.de
www.sla.tu-darmstadt.de/roisman/sprayportal/People.htm

- **Center of Smart Interfaces**

Andreas Lembach,
Tel.: 06151/16-6606
E-Mail: lembach@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de/staff/mitarbeiterdetails_6977.de.jsp

- **Max Planck Institut für Polymerforschung**

Hans-Jürgen Butt, Tel.: 06131/379-110
E-Mail: butt@mpip-mainz.mpg.de
www.mpip-mainz.mpg.de/groups/butt/people/butt

Doris Vollmer, Tel.: 06131/379-113
E-Mail: vollmerd@mpip-mainz.mpg.de
www.mpip-mainz.mpg.de/~vollmerd

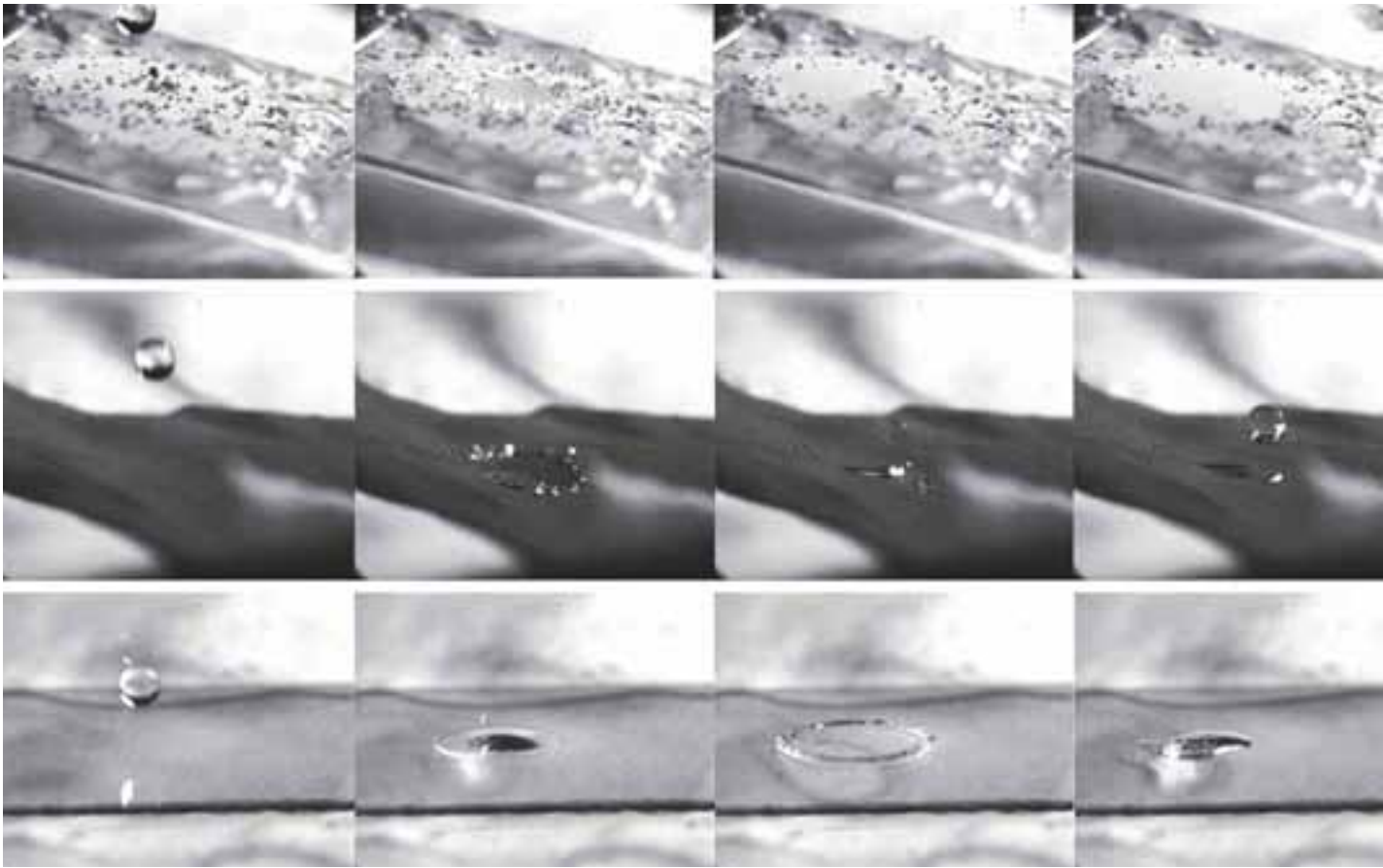


Abbildung 4
Stadien des Tropfenaufpralls auf (oben) einer Himbeerteilchen-Oberfläche, (Mitte) einem Lotusblatt und (unten) einer Glasoberfläche.

Oberfläche trifft. Innerhalb von nur 0.1 Millisekunden durchläuft der Tropfen eine Vielzahl von Stadien. Er rollt nicht einfach vom Blatt. Er kann zunächst in viele kleine Tropfen aufreißen, die sich wieder vereinigen, bis der Tropfen schließlich von der Oberfläche rollt oder gar hüpf.

Dieser Prozess lässt sich mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera verfolgen. In Abbildung 4 haben wir charakteristische Zeitpunkte kurz vor und nach dem Tropfenaufprall dargestellt. Das Verhalten des Tropfens auf der Himbeerteilchen-Oberfläche (oberste Reihe) und dem Lotusblatt (mittlere) ähneln sich. Der Tropfen bildet zunächst eine Pizzaform, zieht sich dann wieder zusammen und prallt von der Oberfläche ab. Zur Veranschaulichung der selbstreinigenden Wirkung unserer Oberfläche haben wir sie „verschmutzt“. Einen Teil der Schmutzpartikel schleudert der Tropfen weg, einen weiteren Teil schließt er in sich ein, und entfernt sie so von der Oberfläche. Der aufprallende Tropfen hinterlässt einen sauberen Fleck. Trifft ein Tropfen auf eine Glasplatte (unten) bleibt er flach liegen und benetzt die Oberfläche.

Parabelflüge bilden eine interessante Möglichkeit, Adhäsion und ungeklärte Phänomene des Tropfenaufpralls sowie der Be- und Entnetzung zu studieren. Bei diesen Flügen wird durch eine Parabelflugbahn im Flugzeug für 20 Sekunden Schwerelosigkeit erzeugt. Dieses ist wohl die

spektakulärste Version von grundlegender und vor allem innovativer Forschung am CSI der TU Darmstadt.



Ilia Roisman ist Principal Investigator des Center of Smart Interfaces. Er untersucht wandnahe Mehrphasenströmung, insbesondere mehrphasigen Wärme- und Spraytransport, Zerstäubung und Einfluss von Mikrogravitation.



Andreas Lembach ist Doktorand am Center of Smart Interfaces der Technischen Universität Darmstadt. Er untersucht den Tropfenaufprall auf unterschiedlichen Oberflächen, inklusive poröser Medien.



Doris Vollmer ist Projektleiterin am Max Planck Institut für Polymerforschung. Ihre Arbeitsgebiete: Superhydrophobizität, Kolloide in externen Feldern, Entmischungsdynamik.



Hans-Jürgen Butt ist seit 2002 Direktor am Max Planck Institut für Polymerforschung und Principal Investigator des Center of Smart Interfaces. Sein Arbeitsgebiet ist die Physik und Chemie von Grenzflächen.

Wasser – Energiequelle der Zukunft?



„Ja, meine Freunde, ich glaube, Wasser wird eines Tages als Treibstoff verwendet werden; seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff werden, einzeln oder gemeinsam, unerschöpfliche Quellen von Wärme und Licht sein. (...) Ich glaube, wenn die Kohlevorräte erschöpft sind, heizen wir mit Wasser. Wasser ist die Kohle der Zukunft“ (Jules Verne, 1874). Leider hat uns der famose Schriftsteller nicht den Weg aufgezeigt, wie wir das Wasser so effektiv einsetzen können, da natürlich nicht das Wasser selbst, sondern der daraus mit Energieeinsatz hergestellte Wasserstoff der eigentliche Brennstoff ist.



► Water: Energy Source of the Future?

“Yes, my friends, I believe that water will one day be employed as fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light.... I believe, then, that when the deposits of coal are exhausted we shall heat and warm ourselves with water. Water will be the coal of the future“ (Jules Verne, 1874). Unfortunately, this famous author has not left us the recipe to bring water to such an effective use, since of course not the water itself, but the hydrogen is the actual fuel. This has to be liberated from water by the application of a large amount of energy.

Bernhard Kaiser, Benoit Gobaut und Wolfram Jaegermann • Seit der Entdeckung des photoelektrischen Effekts durch Edmond Becquerel im Jahr 1839 sind Wissenschaftler und Ingenieure von der Idee erfüllt, Licht in elektrische Energie umzuwandeln oder in chemischen Brennstoffen zu speichern. Dabei wird das Gas Wasserstoff als Energieträger der Zukunft seit vielen Jahren konträr diskutiert. Eines ist jedenfalls ziemlich sicher: Wasserstoff wird in der einen oder anderen Form eine bedeutende Rolle für die Energieversorgung kommender Generationen auf der Erde spielen, da Wasserstoff alleine oder daraus abgeleitete chemische Verbindungen einen effizienten und sauberen Weg darstellen, Energie, die ohne CO₂-Emissionen erzeugt wurde, zu speichern. Mit der Hilfe geeigneter Katalysatoren wird es in Zukunft möglich sein, Wasserstoff und Kohlendioxid in flüssige Brennstoffe umzuwandeln, und somit die Konzentration an dem Treibhausgas CO₂ in der Atmosphäre deutlich zu verringern. Ein Problem, welches für die Menschheit von zumindest gleich-

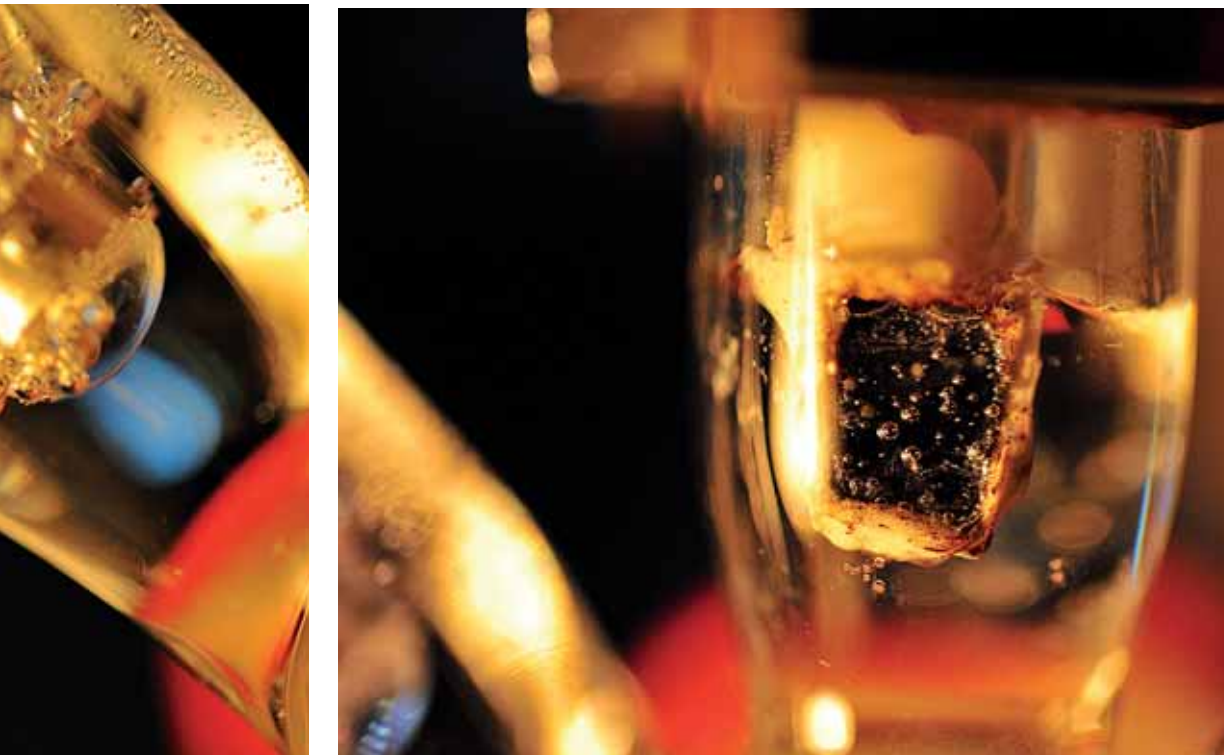


Abbildung 1
 Fotografie des experimentellen Aufbaus zur Untersuchung der photoelektrochemischen Aktivität von Halbleiterelektroden. Links: Die elektrochemische Zelle besteht aus drei Schenkeln. In diesen befinden sich von links nach rechts die Platingenelektrode, die p-GaAs-Arbeits- und eine AgCl/Ag-Referenzelektrode. Sichtbares Licht wird mittels eines Glasfaserbündels auf die Halbleiterelektrode fokussiert. Die Stromspannungs-Charakteristik wird mit einem Standardpotentiostaten aufgenommen. Rechte Seite oben: Wasserstoffentwicklung an der Arbeitselektrode. Rechts: Sauerstoffentwicklung an der Gegenelektrode.

rangiger Bedeutung ist, wie der erschöpfliche Vorrat an fossilen Brennstoffen. Wasserstoff ist das bei weitem häufigste Element im Universum und kann aus vielen Substanzen und auf unterschiedlichen Wegen gewonnen werden. Mit ihm lassen sich effiziente Brennstoffzellen betreiben, die Wärme und Strom liefern und dabei nur sauberes Wasser als Verbrennungsprodukt ausstoßen. Der sichere Umgang, d. h. der Transport und die Lagerung von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff ist heute Industriestandard. Allerdings ist er kein Primärenergieträger, wie z. B. Kohle oder Erdöl, sondern er muss erst aus seinen Verbindungen, wie z. B. Methan und Wasser, gewonnen werden. Die Prozesse zur Herstellung des reinen, elementaren Wasserstoffs benötigen heute noch sehr viel Energie und sie sind in den meisten Fällen nicht klimaneutral, d. h. es entsteht gleichzeitig eine große Menge an CO₂. Daher befassen wir uns mit der Entwicklung von Methoden zur umweltfreundlichen und effizien-

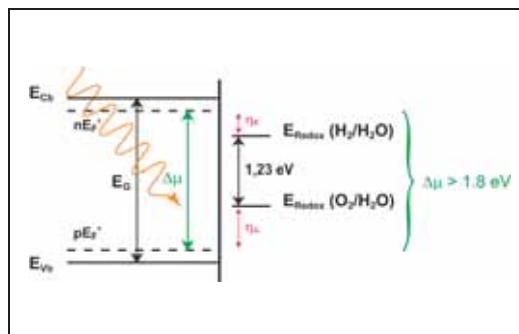
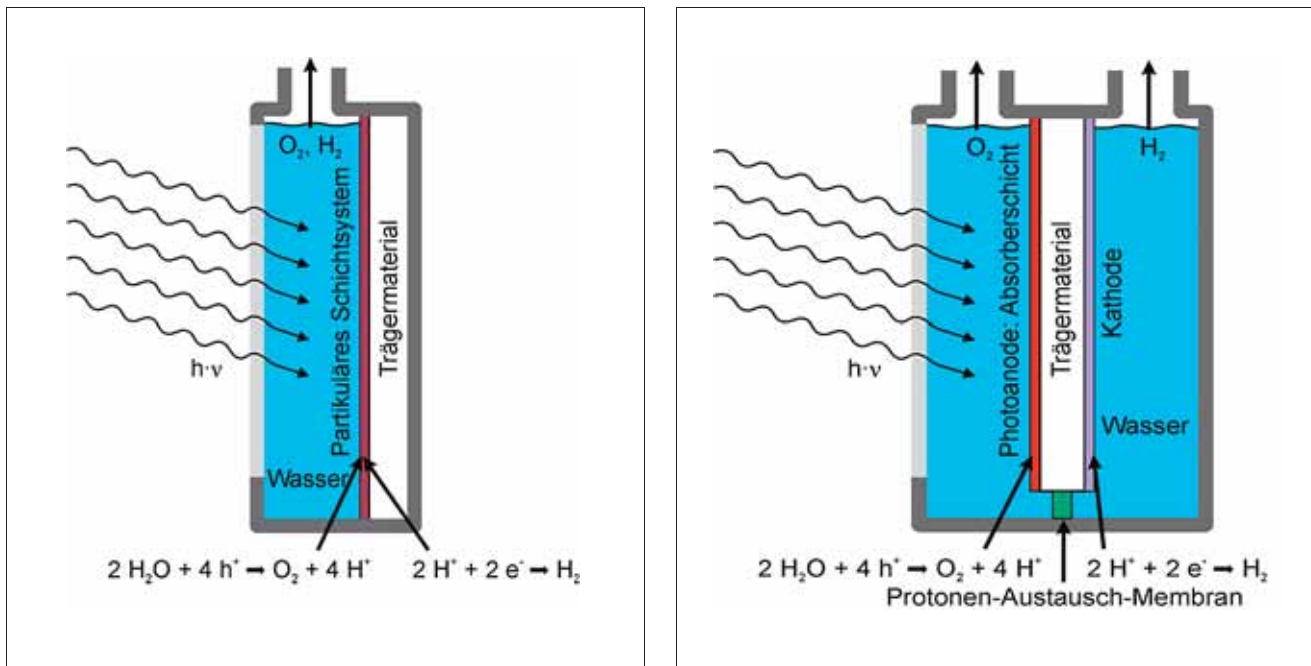


Abbildung 2
 Energiebandschema für eine Halbleiter-Elektrolyt-Grenzfläche unter Belichtung. E_C und E_V : Energien der Leitfähigkeits- bzw. Valenzbandkante, E_G : Bandlücke des Halbleiters. η entspricht den Überspannungen an Kathode und Anode. nE_i^* und pE_F^* : Lage der Quasi-Ferminiveaus von Elektronen bzw. Löchern. Die Differenz $\Delta\mu$, d. h. die Photospannung U_{ph} , muss mindestens größer als das Redoxpotential des Wassers von 1,23 eV plus der Überspannung sein. Für einen belichteten Halbleiter ist die erzielbare Photospannung in der Regel $U_{ph} < E_G - 0.4$.

ten Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe der Sonnenenergie.

Warum nicht schon eher?

Wasserstoff lässt sich sowohl aus Biomasse, Gas und Kohle gewinnen. Das dabei entstehende Kohlendioxid führt aber zu einer deutlichen Verschlechterung der ökologischen Bilanz. Eine Erzeugung aus den regenerativen Energien Wind und Sonne in



Kombination mit einem Elektrolyseur stellt eine entsprechend bessere Alternative dar. Allerdings liegt hier der kombinierte Wirkungsgrad bei nur etwa 7 % für die Umwandlung von Solarenergie in Wasserstoff, wenn man Umwandlungsausbeuten von 15 % für die Photovoltaik (PV) und 50 % für die Elektrolyse zugrunde legt. Unter optimalen Bedingungen ließen sich theoretisch Wirkungsgrade von ca. 17 % erreichen (PV: 25 %, Elektrolyse: 70 %). Das Spektrum der Sonneneinstrahlung auf der Erde reicht vom fernen Infrarot bis hin zum nahen Ultraviolettbereich (ca. 3 eV) auf Meeresniveau. Da Wasser in diesem Bereich keine elektromagnetische Strahlung absorbiert, muss sie durch einen Vermittler, wie z.B. geeignete Halbleitermaterialien, in das System eingebracht werden.

Diese sogenannte direkte photoelektrochemische Umwandlung von Sonnenlicht in Wasserstoff kann theoretisch einen Wirkungsgrad von mehr als 20 % erreichen (in Abhängigkeit von der Bandlücke des verwendeten Halbleitermaterials) und ist somit den oben genannten Methoden vorzuziehen (Die Effektivität der Brennstoffherzeugung auf biologischer Basis liegt z. B. bei nur 1 % bis maximal 6 %). In Laborexperimenten wurden bisher

für einfache Halbleiterelektroden Wirkungsquerschnitte von bis zu 8,2 % und für Tandemzellen bis zu 18,3 % erzielt. Durch die Kombination von Absorbermaterialien mit sehr geringen Mengen von Katalysatormetall (Nanotechnologie im Jahre 1981!) konnte die Effektivität einfacher Halbleiterelektroden sogar auf bis zu 12 % gesteigert werden. Die hierbei verwendeten Einkristallmaterialien besitzen aber alleine keine ausreichende Photospannung, und sie sind für eine weitreichende technische Anwendung zu teuer. Daher ist unser Forschungsziel die Entwicklung photoelektrochemischer Zellen mit einer hinreichenden Photospan-

Abbildung 3

Schematische Darstellung des möglichen Aufbaus einer photoelektrochemischen Zelle mit einer oder zwei fest-flüssig-gasförmig Grenzflächen.

• Center of Smart Interfaces

PD Dr. Bernhard Kaiser, Tel.: 06151/16-69664

E-Mail: kaiser@csi.tu-darmstadt.de

www1.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ofl/team/bkaiser/index.html

• Institut für Materialwissenschaften

Benoit Gobaut, Tel.: 06151/16-70837

E-Mail: bgobaut@surface.tu-darmstadt.de

www1.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ofl/index.tud

Prof. Dr. Wolfram Jaegermann, Tel.: 06151/16-6304

E-Mail: jaegermann@surface.tu-darmstadt.de

www1.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ofl/index.tud

Zukunft mit Energie.



© Mainova AG

Mit Ideen hat engagierter Nachwuchs beim führenden Energiedienstleister in Rhein-Main beste Perspektiven. Wie Florian Neubauer, der als Praktikant und Diplomand bei uns eingestiegen ist. Als Mainova-Mitarbeiter sorgt er heute für die effiziente Wärmeversorgung der J. W. Goethe-Universität Frankfurt und hat vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten. Interessiert an einer Karriere mit Energie? bewerbung@mainova.de



Strom | **Erdgas** | **Wärme** | **Wasser**

www.mainova.de, ServiceLine 0800 11 444 88 (kostenfreier Service)

— ANZEIGE

nung, basierend auf preiswerten und chemisch stabilen Dünnschichtabsorbern in Kombination mit geeigneten Nanokatalysatormaterialien.

Die energetischen Anforderungen für die Wasserspaltung sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Bei der direkten Wasserspaltung an einer Halbleiter/Elektrolytgrenzfläche muss die Leitungsbandkante des verwendeten Halbleiters unter Betriebsbedingungen negativer sein als das Standard-Redoxpotential zur Reduktion von Protonen, die Valenzbandkante muss positiver sein als das Oxidationspotential von H_2O bei der Sauerstoffherzeugung; in der Konsequenz müssen beide

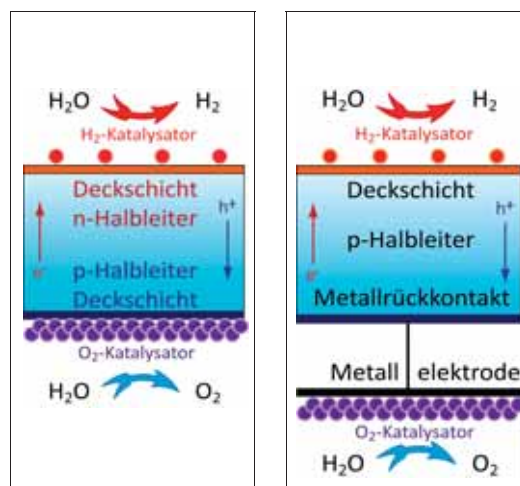
thermodynamischen Potentiale inklusive Überspannungen innerhalb der Energielücke des Halbleiters liegen.

Die Realisierung

Der grundlegende Aufbau einer photoelektrochemischen Zelle ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Zelle kann sowohl aus einem partikulären Schichtsystem auf einem geeigneten Träger aufgebaut sein, als auch aus einem Träger mit getrennter Anoden- und Kathodenschicht. Erstere besitzt zwar einen einfacheren Aufbau, jedoch müssten die entstehenden Gase im Nachhinein noch getrennt

Abbildung 4

Mögliche Bauteilstrukturen für eine Zelle bestehend aus einem Absorbermaterial. Die Deckschicht dient dem Schutz des Absorbers gegen elektrochemische Zersetzung. Entsprechende Katalysatoren werden benötigt, um Überspannungen zu reduzieren und praktikable Stromdichten und somit Ausbeuten an Wasserstoff und Sauerstoff zu erzielen.



Tandemzellen – höhere Wirkungsgrade

Anstatt ein einzelnes Absorbermaterial mit großer Bandlücke zu verwenden, ist es auch möglich, zwei Absorbermaterialien mit unterschiedlicher Bandlücke zu kombinieren. Dabei werden zwei Halbleitermaterialien hintereinander geschaltet, deren Bandlücke jeweils im Bereich zwischen 1 eV und 1,8 eV liegt. Die weiteren Anforderungen an Stabilität und Aktivität sind ähnlich denen, wie sie auch schon für die Einzelabsorbermaterialien diskutiert worden sind. Eine solche Kombination besitzt den Vorteil, dass die Absorption in einem Bereich des solaren Lichtspektrums stattfindet, in dem die Intensität deutlich höher ist als bei Energien größer als 2 eV.

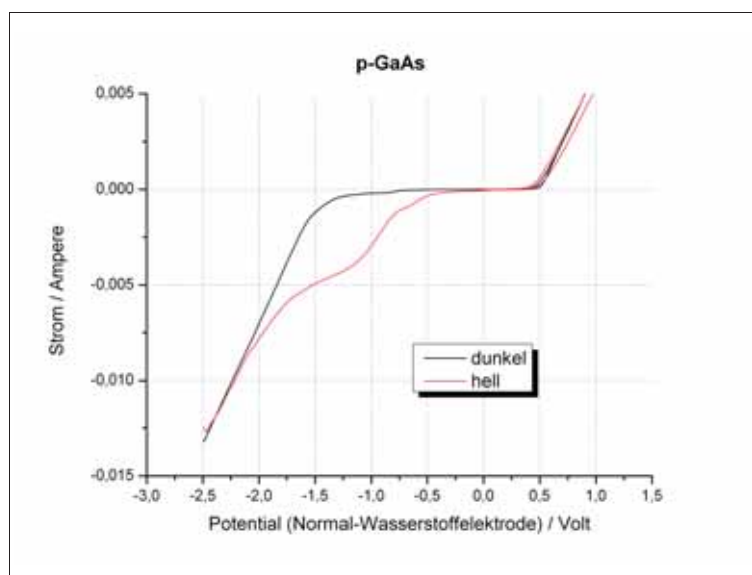
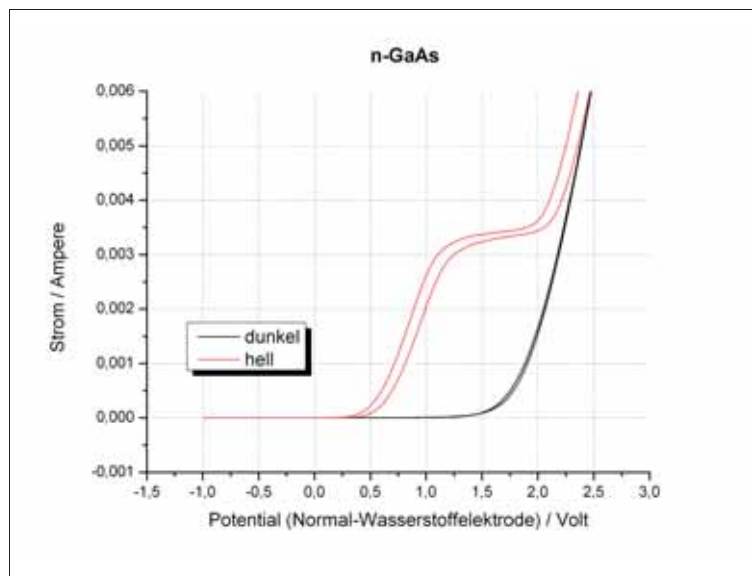


Abbildung 5
Strom-Spannungskennlinien für GaAs-Arbeits Elektroden, oben: n-dotiert, unten: p-dotiert. Es lässt sich eine deutliche Verschiebung der aufzubringenden Potentiale zu niedrigerem bzw. höherem Potential für den hell/dunkel Effekt beobachten.



Bernhard Kaiser arbeitet seit dem Sommer 2008 am Center of Smart Interfaces mit dem Schwerpunkt nanostrukturierte Systeme und ist für das Projekt photoelektrochemische Wasserspaltung verantwortlich.



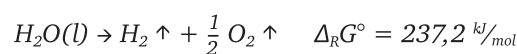
Benoit Gobaut ist Austauschstudent (FAME) von der Universität Grenoble. Er fertigt zur Zeit seine Masterarbeit zur photoelektrochemischen Wasserspaltung am Institut für Materialwissenschaften an.



Wolfram Jaegermann ist seit 1997 Professor für das Fachgebiet Oberflächenforschung am Institut für Materialwissenschaften und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces.

Wieviel Energie ist nötig?

Die Anforderung an die Energielücke ergibt sich aus dem thermodynamischen Energiebedarf für die Wasserspaltung



von 1.23V, aus Überspannungen an der Anode (0.4V) und der Kathode (0.1V), aus dem Abstand der Fermi-niveaus zu den Bandkanten von mindestens $2 \times 0.15\text{eV}$, sowie aus der Triebkraft für die Ladungsträger-trennung von 0.2eV. Die Bandlücke muss daher mindestens einen Wert von Eg 2.2 eV aufweisen.

werden. In der zweiten Variante entstehen Wasserstoff und Sauerstoff jeweils in räumlich getrennten Kompartimenten der Zelle. Abbildung 4 zeigt mögliche Bauteilstrukturen für Zellelemente bestehend aus einem Absorbermaterial, Deck- und Kontaktschichten und den entsprechendem Katalysator-material.

Ein einfacher experimenteller Aufbau, wie er in unserem Labor in ersten Experimenten zur Untersuchung der photoelektrochemischen Aktivität von GaAs-Einkristallen eingesetzt wird, ist in Abbildung 1 dargestellt. GaAs ist ein weitverbreitetes, gut untersuchtes Halbleitermaterial mit einer Bandlücke von 1.43 eV. Die Bandlücke ist zwar zu niedrig, um mittels einer solchen Zelle ohne weitere Hilfsmittel Wasserstoff zu produzieren, doch lassen sich damit typische photoelektrochemische Phänomene beobachten und testen.

Ein repräsentatives Messergebnis ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die Belichtung der Arbeitselektroden führt zu einem Auftreten eines Photostromes bei deutlich niedrigeren Potentialen als im Dunkel-fall. Allerdings führt das eingestrahelte Licht im Fall des n-GaAs zu keiner Gasproduktion an der Elektrode, sondern zu ihrer Zersetzung. An der p-GaAs-Elektrode findet stattdessen eine deutliche Wasserstoffproduktion statt. Die Gesamtausbeute an Wasserstoff ist zwar sehr hoch, doch es ist ein zusätzliches Arbeitspotential notwendig, so dass der Gesamtprozess wirtschaftlich nicht von Bedeutung ist. Daher sind für unsere weiteren Untersuchungen Halbleiter mit größerer Bandlücke (ZnTe, GaP) vorgesehen. Verbesserte Wirkungsgrade lassen sich ins-

besondere auch durch das Aufbringen von Katalysatorteilchen erwarten.

Let's start

Die photoelektrochemische Erzeugung von Wasserstoff ist eine technisch höchst interessante und gleichzeitig einfach durchführbare Möglichkeit, regenerativ einen Energieträger zu erzeugen, ihn zu speichern, zu transportieren und für die verschiedensten Anwendungsbereiche zu nutzen. Theoretisch können durch die Kombination geeigneter Halbleitermaterialien Wirkungsgrade bis zu mehr als 30 % erreicht werden. In Laborexperimenten konnten Wirkungsgrade von mehr als 18 % be-

reits erreicht werden. Allerdings sind die bisher eingesetzten Materialien entweder zu teuer oder nicht stabil genug für einen längerfristigen technischen Einsatz.

Die zeitnahe Lösung dieser Probleme stellt eine besondere materialwissenschaftliche und technische Herausforderung dar, die einen interdisziplinären Forschungsansatz benötigt: Durch geeignete Dünnschicht- und Nanomaterialien sind sowohl die Material- und somit auch die Kosteneffizienz deutlich zu verbessern. Dazu sind systematische Untersuchungen zu Größen- und Materialeffekten, sowie die umfassende Charakterisierung der Fest/Flüssig/Gasförmig-Grenzfläche notwendig.

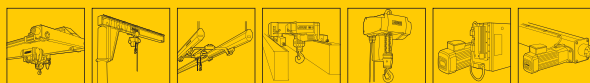
ANZEIGE

WIR MACHEN IHNEN



DAS HEBEN LEICHTER.

ABUS Hallenkrane machen Kraft, Zuverlässigkeit und sichere Funktion überall dort verfügbar, wo sie gebraucht werden. Denn gerade da, wo tonnenschwere Lasten bewegt werden müssen, kommt es auf behutsames Handling und Fingerspitzengefühl an. ABUS Krane und Hebezeuge werden von Experten für Experten entwickelt. Wir erarbeiten Konzepte für wirtschaftliche Fördertechniken, die sich präzise in Ihr Konzept vom Materialfluss-Management integrieren lassen.



ABUS Wir bewegen etwas.
Kransysteme

ABUS Kransysteme GmbH · Sonnenweg 1 · 51647 Gummersbach
Tel. 02261 37-0 · Fax 02261 37-247

E-Mail: info@abus-kransysteme.de · www.abus-kransysteme.de

Schweißtechnische
Lehr- und Versuchsanstalt
Mannheim GmbH



Achtung Förderungsmöglichkeit auch für Studenten im Jahr 2009:

EU-Fördermaßnahme

30% der Lehrgangsgebühren können für Teilnehmer aus Baden Württemberg durch die EU getragen werden.

Ihre Perspektiven für die Zukunft auf dem
deutschen und weltweiten Arbeitsmarkt.
Internationaler Schweißfachingenieur-
Tageslehrgang (Mo - Fr)

Februar 2009 bis Mai 2009 und
August bis November 2009

Wochenendlehrgang (Fr+Sa)

Oktober 2009 bis Juni 2010

Zugangsvoraussetzung: Studium mit
Diplom-, BSc-oder MSc-Abschluss an
BA, FH, TH, Uni. Sonderregelungen zur
Anerkennung von Teil 1

Schweißtechnische
Lehr- und Versuchsanstalt
Mannheim GmbH



Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mannheim GmbH
Personalwesen

Postfach 12 17 52 · 68068 Mannheim · Telefax (0621) 3004-291 · Telefon (0621) 3004-123
Hausadresse: Käthe-Kollwitz-Straße 19 (Neuer Meßplatz) · 68169 Mannheim
Internet: www.slv-mannheim.de E-Mail: info@slv-mannheim.de

Wärmeübertragung

– vom Frühstücksei zur Chipkühlung

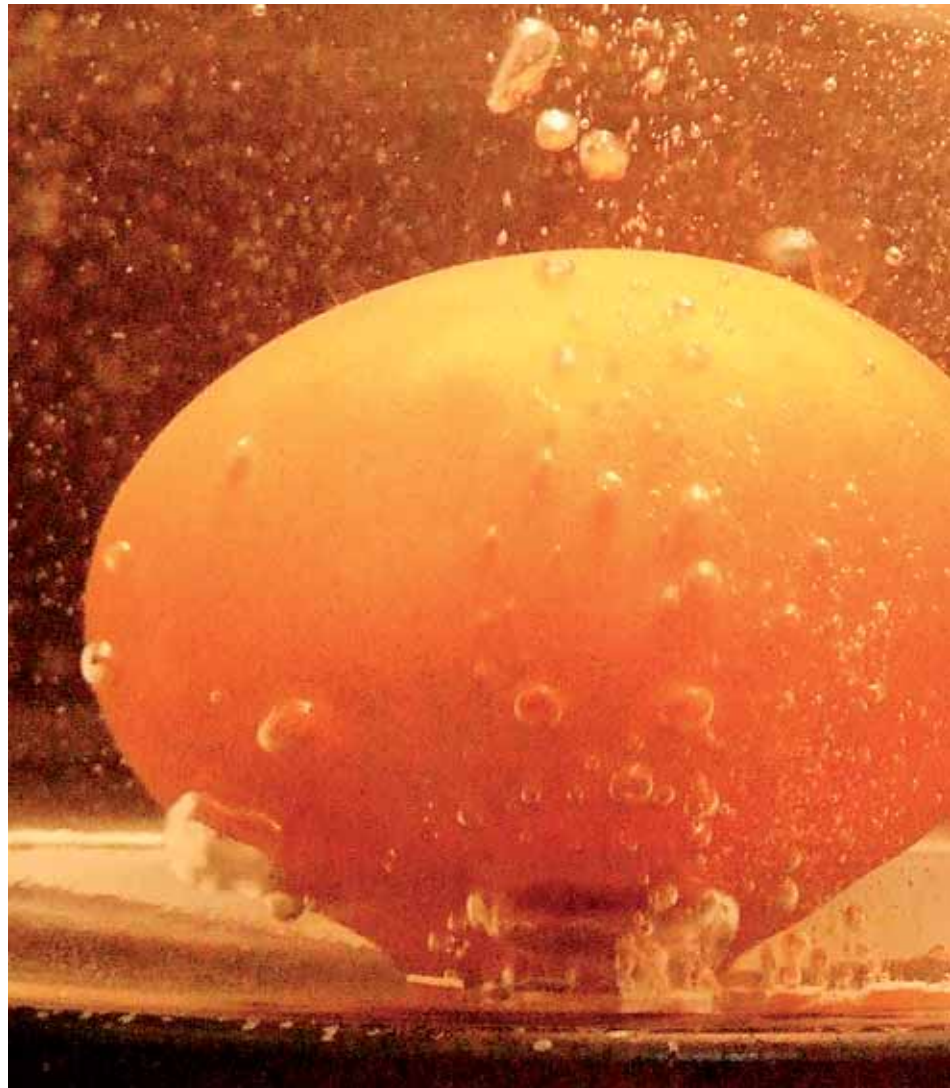
Sieden ist ganz einfach, wenn man nur ein Ei kocht. Wenn es allerdings um Dampferzeugung in Kraftwerken oder Kühlung von Hochleistungselektronik geht, der Prozess und seine Grenzen genau bekannt sein müssen, erkennt man die hohe Komplexität des Vorgangs, der in vielen Details noch unverstanden ist. In modernen technischen Anwendungen müssen immer höhere Wärmeströme auf immer kleinerem Raum abgeführt werden. Dies macht die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Phänomen Sieden unabdingbar. Am Fachgebiet Technische Thermodynamik und am



CSI wird das Verständnis des Siedens sowohl experimentell als auch theoretisch und numerisch erweitert.

► Heat Transfer: Boiling Eggs and Cooling Computer Chips

Boiling is very easy if you only boil an egg. However, if you need to know the process and its limitations very precisely because you want to design a steam generator in a power plant or a cooling device for high performance electronics, one recognizes that boiling is a highly complex process with still many unknowns. As more and more heat must be transferred in less and less space in many modern technical applications, there is a need to scientifically investigate the boiling phenomenon. Scientists at TTD and CSI extend the knowledge about boiling experimentally as well as theoretically and numerically.



Peter Stephan, Steffen Hardt, Christian Kunkelmann, Nils Schweizer und Axel Sielaff • Beim Sieden von Flüssigkeiten wird sehr effizient Wärme übertragen, d.h. schon bei geringen Temperaturdifferenzen werden große Wärmeströme erreicht. Dies macht Sieden interessant für viele Anwendungen, beispielsweise in Dampfkraftwerken, in Kälteanlagen oder bei der Kühlung von elektronischen Bauteilen. Zur Auslegung von Siedeapparaten stehen empirische Gleichungen zur Verfügung, deren Genauigkeit häufig unbefriedigend ist. Genauere

Gleichungen sind nicht verfügbar, da die Details der Wärmetransportphänomene beim Sieden noch weitgehend unergründet sind.

Hier setzt die Forschung am Fachgebiet für Technische Thermodynamik (TTD) und am Center of Smart Interfaces (CSI) an. In Experimenten werden Details der Transportvorgänge an einzelnen wachsenden Dampfblasen sowie an ganzen Blasenschwärmen untersucht. Flüssigkeiten und Randbedingungen werden dabei systematisch variiert und Messdaten, die Rückschlüsse auf



die Details der Transportvorgänge zulassen, mit hoher Auflösung aufgezeichnet. Parallel und eng verzahnt mit den Experimenten werden mathematische Modelle zur Beschreibung der Transportvorgänge und entsprechende Lösungsverfahren entwickelt.

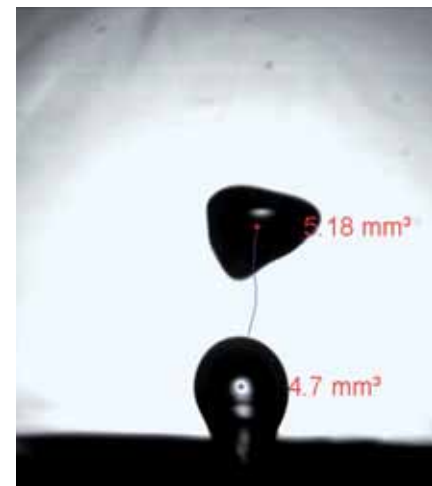
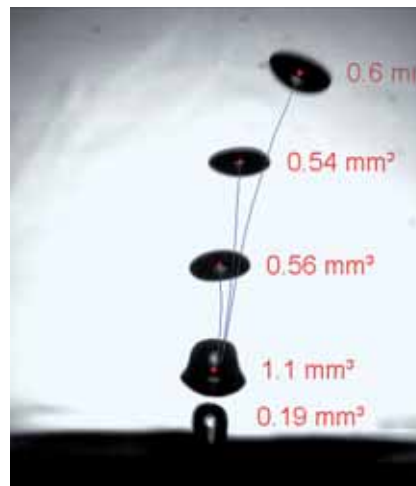
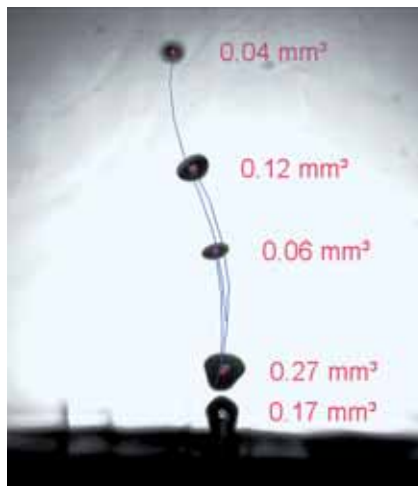
Experimente in der Schwerelosigkeit

Um die dem Blasensieden zugrunde liegenden physikalischen Phänomene und deren Interaktion grundlegend zu verstehen, werden Versuche mit

zeitlich und räumlich sehr hoch auflösenden Messtechniken unter anderem in Schwerelosigkeit durchgeführt. Dabei gibt es mehrere Gründe für die Durchführung der Experimente in der Schwerelosigkeit. Zum einen werden Effekte sichtbar und messbar, die unter normalen Schwerkraftbedingungen durch Auftrieb und natürliche Konvektion überdeckt werden, wie beispielsweise die Marangoni-Konvektion. Der Abreißdurchmesser der Dampfblasen wird zudem größer und der Prozess verlangsamt sich. Das wirkt sich positiv auf

Abbildung 1

Blasensieden: Beim Kochen eines Frühstückseis in Wasser (links) sowie zur hoch effektiven und geräuschlosen Kühlung eines Computerchips unter Verwendung eines elektrisch nicht leitenden Kältemittels. (rechts).



die experimentelle Erfassbarkeit der hoch dynamischen Vorgänge aus. Ein weiterer Grund für die Untersuchung in Schwerelosigkeit ist Vorbereitung von Siedeanwendungen in der Raumfahrt, z.B. für die Kühlung von Elektronik in Satelliten.

Bei den vom TTD/CSI-Team durchgeführten Parabelflug-Experimenten wird Blasensieden des Kältemittels FC-72 an einer einzelnen künstlichen Keimstelle induziert. Als beheizte Wand dient eine 20 μm dünne Edelstahlfolie, die durch Anlegen einer elektrischen Spannung beheizt wird. Die Temperaturverteilung der Edelstahlfolie in der Nähe der Keimstelle wird mit einer Hochgeschwindigkeits-IR-Kamera gemessen.

Synchron dazu werden die sich schnell verändernden Blasenkonturen mit einer zweiten Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Eine Vielzahl weiterer Mess- und Regeleinrichtungen ist notwendig, um variable thermodynamische Bedingungen in der Siedezelle einzustellen und Messdaten zu erfassen. Dies sind z.B. Gleichspannungsstromquellen, Flüssigkeits- und Vakuumpumpen, Temperatur- und Drucksensoren, Messdatenerfassungssysteme und Lichtquellen. Obwohl der dünne Heizer selbst nur eine Fläche von ca. 3 cm^2 aufweist, benötigt der komplette Versuchsaufbau eine Grundfläche von fast 2 m^2 und wiegt etwa 400 kg. Für die Parabelflüge wird der Aufbau in den Airbus A300 „zero-g“ eingebaut, der im Auftrag der ESA und des DLR regelmäßig von Bordeaux aus abhebt.

Die 3-Phasen-Kontaktlinie

An der 3-Phasen-Kontaktlinie trifft die Flüssigkeit-Dampf-Phasengrenze auf die Wand. Hier werden extrem hohe lokale Verdampfungsraten erreicht, die großen Einfluss auf das Blasenwachstum haben. Die physikalischen Vorgänge an der 3-Phasen-Kontaktlinie spielen sich auf einer Längenskala von der Größenordnung Mikrometer ab, und deren Erfassung und Beschreibung sind somit eine große Herausforderung für die Messtechnik sowie die Simulation.

Die aufgezeichneten Sequenzen zeigen das Verhalten der Blasen bei unterschiedlichen Schwerkraftbedingungen, wie beispielsweise in Abbildung 2 zu sehen ist. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Temperaturabdruck einer Blase auf der Heizwand. Extrem große Temperaturgradienten und besonders hohe Verdampfungsraten werden in der Nähe der 3-Phasen-Kontaktlinie beobachtet (siehe Infobox).

Numerische Berechnungen

Neben den experimentellen Untersuchungen helfen numerische Berechnungen, den Siedeprozess besser verstehen und für neue Anwendungen vorhersagen zu können. Ähnlich wie bei den experimentellen Arbeiten liegt auch hier der Schwerpunkt zunächst auf der Untersuchung einzelner

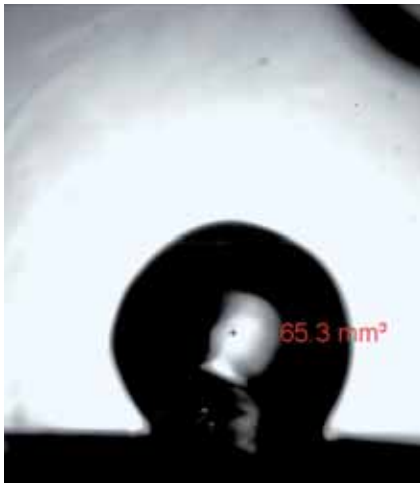


Abbildung 2
Während des Parabelfluges bei unterschiedlicher Gravitation aufgenommene Dampfblasen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Durchmesser der Blasen zum Zeitpunkt des Abriss mit sinkender Schwerkraft deutlich zunimmt. Im Gegensatz dazu nimmt die Blasenfrequenz an der Keimstelle ab.

Blasen mit möglichst hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Im Siedeteam bei TTD/CSI wird zur Simulation des Blasensiedens die frei zugängliche Open-Source Software OpenFOAM eingesetzt, mit der die Gleichungen für den Fluidtransport auf einem Berechnungsgitter gelöst werden. Alle vorangegangenen Versuche, kommerzielle Software zur Berechnung der komplexen Vorgänge einzusetzen, sind gescheitert. Die Verwendung von OpenFOAM hat den Vorteil, dass die Funktionalität erweitert und an spezifische Probleme angepasst werden kann, denn die Schwierigkeiten sind vielfältig. So ist beispielsweise die Berechnung von Dampf-Flüssigkeits-Strömungen immer noch eine

• **Fachgebiet Technische Thermodynamik**

Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Tel.: 06151/16-3159
E-Mail: pstephan@ttd.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Nils Schweizer, Tel.: 06151/16-3887
E-Mail: schweizer@ttd.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Christian Kunkelmann, Tel.: 06151/16-4770
E-Mail: kunkelmann@ttd.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Axel Sielaff, Tel.: 06151/16-3887
E-Mail: sielaff@ttd.tu-darmstadt.de
www.ttd.tu-darmstadt.de

• **Fachgebiet**

**Thermofluidik von Mehrphasenströmungen
Center of Smart Interfaces**

Prof. Dr.rer.nat. Steffen Hardt, Tel.: 06151/16-2581
E-Mail: hardt@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de



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



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

The **DÜRR** Group

SCHENCK
THE ART OF ROTATION

Herausforderung, da auch kleinste numerische Fehler zur Ausbreitung unphysikalischer Wellen entlang der Grenzfläche zwischen Dampf und Flüssigkeit führen, durch welche die Berechnungsergebnisse, z.B. die Bewegungsbahn einer Dampfblase, verfälscht werden.

Eine weitere Herausforderung ist die korrekte Berechnung der lokalen Verdampfungsrate. Die besondere Schwierigkeit beim Blasensieden gegenüber anderen Verdampfungsvorgängen resultiert aus den extrem steilen Temperaturgradienten im Bereich der Phasengrenze. Diese bestimmen die Verdampfungsrate, folglich muss dort das Berechnungsgitter sehr fein gewählt werden. Die Tem-

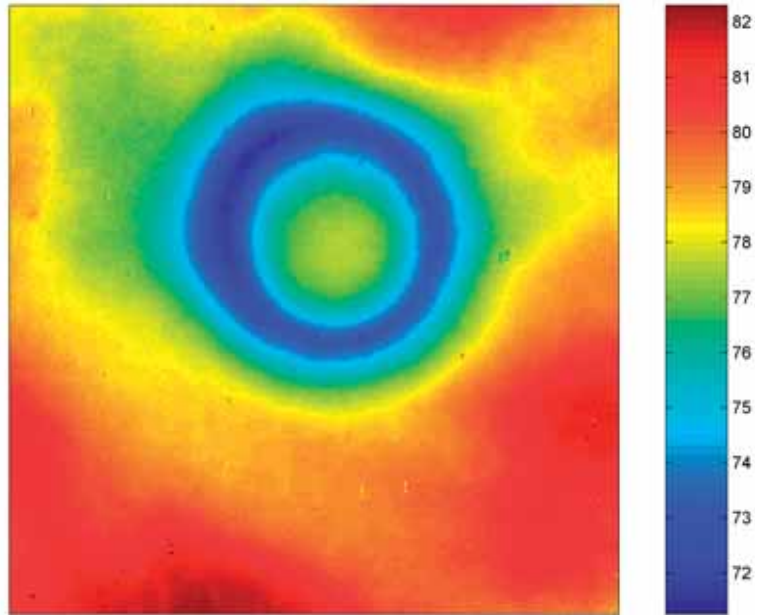


Abbildung 3

Temperaturabdruck [°C] einer Blase in Schwerelosigkeit auf der beheizten Wand. Das mit der IR Kamera aufgenommene Temperaturfeld hat eine Größe von 6,7 mm x 6,7 mm. Die durch die hohe Verdampfungsrate induzierte lokale Abkühlung der Heizwand im Bereich der 3-Phasen-Kontaktlinie ist als ringförmiger Bereich niedriger Temperatur zu erkennen. Der Temperaturanstieg in der Mitte des Blasenfußes ist durch die isolierende Wirkung des Dampfes über der Heizwand zu erklären.

ANZEIGE



The European Space Agency provides for and promotes cooperation amongst European States in space science, research and technology and their space applications. ESA works exclusively for peaceful purposes.

For over three decades the 18 countries of ESA have been pooling their resources to create a dynamic programme of space exploration and technology. Europe's most brilliant scientists and skilled engineers have brought space into our lives through diverse and dynamic means, in the fields of : - Exploration of the solar system and deep space - Launchers - Human space flight and space laboratories - Earth observation and meteorology - Satellite communications - Satellite navigation systems.

ESA is organised in a number of key "centres" - ESA is headquartered in Paris. ESA's technology centre (ESTEC) is located in Holland. The data processing centre (ESRIN) is located in Italy. The astronaut centre (EAC) and the satellite operations centre (ESOC) are located in Germany.

The European Space Agency is continuously looking to recruit aerospace, electrical and mechanical engineers, IT specialists, physicists, mathematicians, astronomers, and astrophysicists. Types of employments encompass a variety of areas: research and development, project support, project management, spacecraft operations and data retrieval and exploitation.

ESA/ESOC

Robert-Bosch-Str. 5 · 64293 Darmstadt - Germany
 Telefon + 49 - 6151 90 2016 · Telefax.:+ 49 - 6151 90 2871
www.esa.int



peratur ändert sich zudem im wandnahen Bereich, wo die Flüssigkeit gegenüber der Sättigungstemperatur stark überhitzt ist, sehr stark in einem nur wenige Mikrometer breiten Bereich. Um dennoch auch dreidimensionale Simulationen bei akzeptablem Rechenaufwand zu ermöglichen, wird ein lokal und zeitlich adaptives Gitter verwendet. Viele existierende numerische oder mechanistische Siedemodelle gehen von einer konstanten Wandoberflächentemperatur aus. Diese Annahme ist aufgrund der neuen experimentellen Resultate zum Wärmestrom und der Temperaturverteilung in der Heizwand jedoch nicht haltbar. Zur genauen Berechnung der Vorgänge muss das Gesamtsystem

Schwerelosigkeit im Parabelflug

Beim Parabelflug wird die Beschleunigung des Flugzeugs allein durch Schwerkraft bewirkt. Anders ausgedrückt: Es befindet sich im freien Fall. Da die Schwerkraft auf alle Körper gleich wirkt, fällt alles sich im Flugzeug befindliche mit und ist auch schwerelos, folglich auch der Versuchsstand und die Experimentatoren. Um den Zustand der Schwerelosigkeit, der etwa 22 Sekunden dauert, einzustellen, wird die Flugbahn des Airbus A300 „zero-g“ einer Wurfparabel angeglichen. Vor der Parabel muss das Flugzeug in den Steigflug, sowie nach der Parabel wieder in den Horizontalflug gebracht werden. In diesen je 20-sekündigen Phasen herrscht eine erhöhte Schwerkraft von bis 1.8-facher Erdbeschleunigung.

ANZEIGE





BEREIT FÜR DEN GROSSEN AUFTRITT?

DIE SOFTWARE AG

BESCHÄFTIGT

- Praktikanten/Werkstudierende
- Absolventen

BETREUT

- Bachelor-Arbeiten
- Master-Arbeiten

FREUT SICH AUF DEINEN BESUCH

www.softwareag.com/jobs
www.softwareag.com/university

BIETET FÜR STUDIERENDE

- Umfangreiches Hochschulprogramm
- Produktschulungen

BIETET FÜR ABSOLVENTEN

- Trainee-Programme
- Internationale Einsatzmöglichkeiten
- Attraktives Einstiegsgehalt

Die Software AG ist der weltweit größte unabhängige Anbieter von Business-Infrastruktursoftware. Unsere 4.000 Kunden erzielen messbare Erfolge durch die Modernisierung vorhandener IT-Systeme und die Erstellung innovativer Lösungen für neue Geschäftsanforderungen.

Unser Produktportfolio umfasst marktführende Lösungen für Datenmanagement, serviceorientierte Architekturen und die effiziente Automatisierung von Geschäftsprozessen. Wir verbinden leistungsfähige IT-Technologie mit Branchen-Know-how und bewährten Best Practices und helfen damit unseren Kunden, ihre Unternehmensziele schneller zu erreichen.

Die Software AG hat ihren Firmensitz in Darmstadt und ist an der Frankfurter Wertpapierbörse notiert.

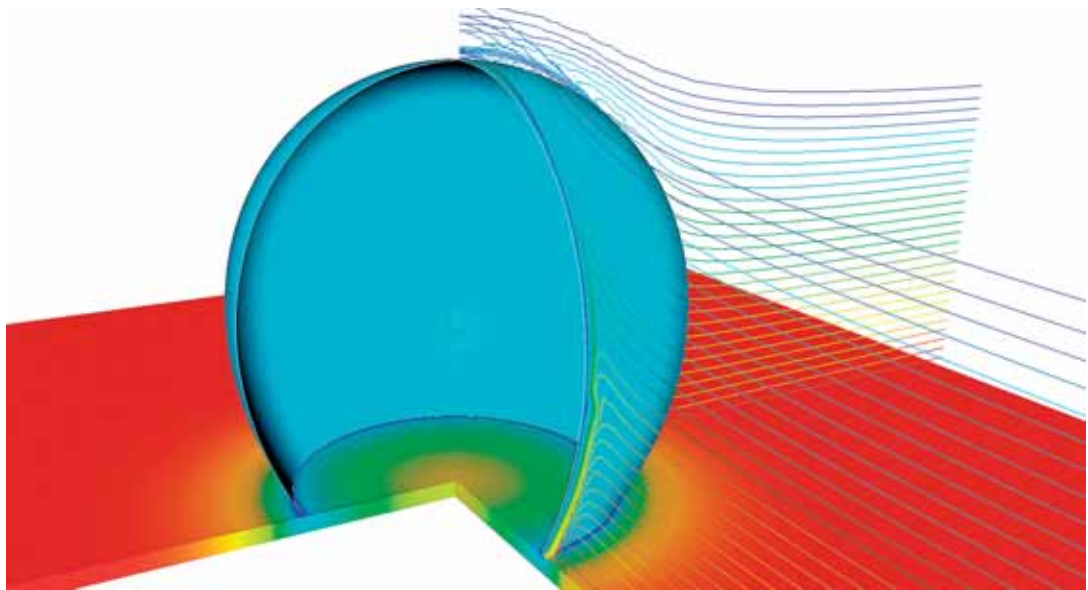


SOFTWARE AG. GET THERE FASTER.™

Contact us at www.softwareag.com

Abbildung 4

Dreidimensionale numerische Simulation des Blasensiedens. Abgebildet sind die Blasenkontur (hellblau), die Isothermen in der Flüssigkeit (farbige Linien) sowie die Heizfolie, auf der die Blase anwächst (Einfärbung entspricht der Temperatur). Gut zu erkennen ist die deutliche Abkühlung der Heizfolie unterhalb der 3-Phasen-Kontaktlinie.



aus Heizwand und Fluid betrachtet werden. Das TTD/CSI-Modell berechnet daher den zeitabhängigen Wärmetransport in der Heizwand und koppelt diesen an die Wärmetransportvorgänge im Fluid. Zusätzlich werden die Vorgänge an der 3-Phasen-Kontaktlinie in einem speziellen Submodell abgebildet. Hierdurch werden die Abkühlung der Heizwand unter der 3-Phasen-Kontaktlinie sowie das Wiederaufheizen nach dem Blasenabriss realitätsnah simuliert.

Es ist bereits gelungen, Einzelblasen numerisch zu berechnen und eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment zu erreichen. Derzeit wird die adaptive Gitterverfeinerung weiter verbessert, um den bestmöglichen Kompromiss zwischen hoher Genauigkeit und akzeptabler Rechenzeit zu finden. So können dann auch die Verschmelzung mehrerer benachbarter Blasen sowie der Einfluss von wandnahen Scherströmungen auf das Blasenwachstum simuliert werden, womit man sich schrittweise den realen Bedingungen eines technischen Siedeprozesses annähert.

Fazit

Die hoch auflösenden Siedeeperimente unter Variation vieler Einflussparameter, u.a. auch der Schwerkraft, geben tiefen Einblick in die lokalen Wärmetransportvorgänge und ermöglichen es, mathematische Ansätze und Rechenverfahren zur Beschreibung des Siedens zu entwickeln und zu validieren. Hierbei zeigte sich, dass jede an der Wand wachsende Dampfblase einen großen Teil der Wärme in einem winzigen Bereich am Fuß der Blase aufnimmt. Die Modellansätze und die numerischen Berechnungsverfahren müssen daher Skalen über mehrere Größenordnungen umfassen, auf denen z.T. unterschiedliche Transportphänomene dominieren. Mit diesen Methoden ist es bereits gelungen, die fluid- und thermodynamischen Vorgänge an Einzelblasensystemen genau zu beschreiben und

somit den Wärmetransport vorherzusagen. Die Erweiterung der Methoden, um Siedevorgänge mit mehreren Blasen und Blasenschwärmen zu beschreiben, ist die nächste Herausforderung. Damit wird es möglich sein, moderne Siedeapparate mit hoher Genauigkeit auszulegen, sowie neue, insbesondere mikrostrukturierte Geometrien zu entwickeln, die eine höhere Leistungsdichte ermöglichen.



Peter Stephan ist Professor für Technische Thermodynamik im Fachbereich Maschinenbau und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces.



Steffen Hardt ist seit April 2009 Professor am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt und leitet dort das Fachgebiet Thermofluidik von Mehrphasenströmungen.



Christian Kunkelmann arbeitet am TTD und entwickelt ein numerisches Modell, mit dem Siedevorgänge mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung simuliert werden können.



Nils Schweizer arbeitet am TTD. Er führt hoch auflösende Messungen bei Siedevorgängen in der Schwerelosigkeit durch und entwickelt zweiphasige Kühlsysteme für Anwendungen in der Raumfahrt.



Axel Sielaff arbeitet am TTD und führt in Bodenversuchen hoch auflösende Messungen an einzelnen und koalierenden Blasen unter besonderer Berücksichtigung von Gemischeffekten durch.

Jeder Erfolg hat seine Geschichte.



BOSCH
Technik fürs Leben

Energie effizienter nutzen – Bosch Thermotechnik

Die Bosch Thermotechnik GmbH steht für den Geschäftsbereich Thermotechnik der Bosch-Gruppe und gehört mit einem Umsatz von insgesamt 2,98 Milliarden Euro und rund 13.000 Mitarbeitern weltweit zu den führenden Anbietern von Systemen für behagliches Raumklima und warmes Wasser. Als Systemanbieter sind wir in der Lage, die unterschiedlichsten Anforderungen der jeweiligen nationalen Märkte wie auch die anspruchsvollsten Bedürfnisse unserer Kunden zu erfüllen. In 18 Fertigungsstätten in neun Ländern produzieren wir energieeffiziente Heiztechniklösungen und Warmwassergeräte, die wir in rund 50 Ländern weltweit vertreiben. Qualität, Innovationskraft und Kundenorientierung bestimmen das Handeln und die Entwicklung unseres Unternehmens. Mit unseren Produktlösungen leisten wir einen aktiven Beitrag zur effizienten Energienutzung und Reduzierung der CO₂-Emissionen.

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

früh Verantwortung. Zusätzlich unterstützen wir den Wechsel zwischen Funktions- und Geschäftsbereichen, Stab und Linie sowie In- und Ausland, damit Sie vielfältige Erfahrungen sammeln können.

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

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

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

Jeder Erfolg hat seinen Anfang.

Hier und jetzt – starten Sie mit uns.

www.bosch-thermotechnik.de

Akku leer – bald nicht mehr?!

Der stetig steigende Energiebedarf von mobilen elektromechanischen Geräten erfordert neue Arten der Energieversorgung. Flüssige Kohlenwasserstoffe besitzen eine wesentlich höhere Energiedichte als Batterien und Akkumulatoren und könnten diese als Energieträger ersetzen. Ziel des hier vorgestellten Projektes ist die Entwicklung eines Mikroenergiewandlers, der die chemisch gebundene Energie in Kohlenwasserstoffen ohne bewegliche Teile in elektrische Energie umwandelt.



▶ Battery Dead – Solution Ahead?!

Portable electronic and mechanical devices demand increasing amounts of energy and thus new ways of supplying that energy. The high energy density of hydrocarbon fuels offers a possible solution to replace batteries. The main goal of this project is to develop a micro energy converter that does not contain any moving parts.

Thomas Kania, Boris Schilder, Peter Stephan, Steffen Hardt und Andreas Dreizler • Mobile elektronische Geräte wie z.B. Notebooks und Mobiltelefone, aber auch Robotersysteme, benötigen immer leistungsstärkere Energiequellen. Die bisher als Energiequellen verwendeten Batterien und Akkumulatoren stoßen jedoch an ihre Leistungsgrenze und zeigen gegenüber anderen Alternativen weitere wesentliche Nachteile.

Die Energiedichte von Batterien ist relativ gering, was die Laufzeit und die Leistungsfähigkeit der elektronischen Geräte stark einschränkt. Lange Ladezeiten beeinträchtigen die Mobilität zusätzlich. Des Weiteren enthalten Batterien oft stark umweltgefährdende Stoffe wie beispielsweise Blei, Cadmium und Zink, die trotz steigender Bemühungen nicht ausreichend vom herkömmlichen

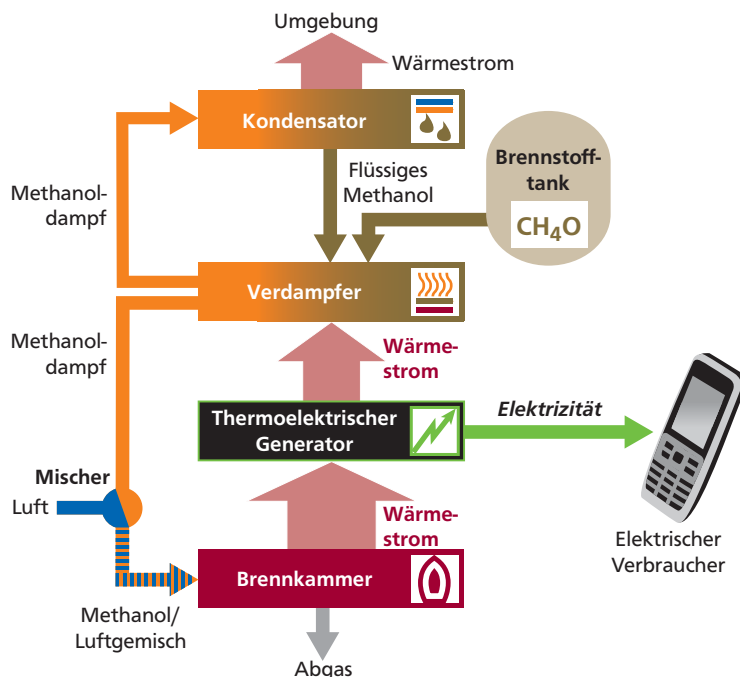


Abbildung 1

Funktionsweise des Mikroenergiewandlers: Das im Brennstofftank gespeicherte flüssige Methanol wird zunächst verdampft, mit Luft gemischt und anschließend verbrannt. Die dabei frei werdende Wärmeenergie wird dem thermoelektrischen Generator auf der heißen Seite zugeführt. Ein Teil dieser Wärmeenergie wird direkt in elektrischen Strom umgewandelt. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der thermisch/elektrischen Energieumwandlung zu erzielen, wird die kalte Seite des thermoelektrischen Generators durch den Verdampfer gekühlt. Wie auch bei thermodynamischen Kreisprozessen steigt der Wirkungsgrad des Generators mit steigender Differenz zwischen hohem (heiße Seite) und niedrigem Temperaturniveau (kalte Seite). Daher werden möglichst gute Wärmeübergänge auf beiden Seiten angestrebt.

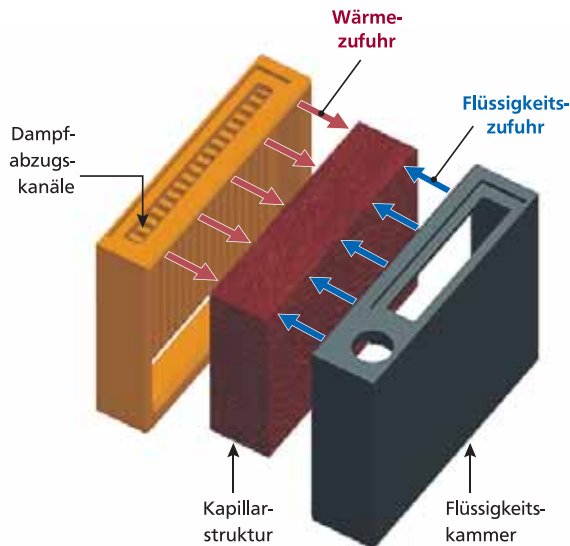


Abbildung 2

Aufbau des Verdampfers:

Die Flüssigkeitskammer dient der Versorgung der Kapillarstruktur mit flüssigem Methanol. Das Methanol wird durch Kapillarkräfte in die Struktur gezogen. Über die Stege der Dampfabzugskanäle wird der Kapillarstruktur Wärme zugeführt. An der Oberfläche der Kapillarstruktur, die an den Dampfabzugskanälen anliegt, findet die Verdampfung des Brennstoffs statt. Der entstehende Dampf wird über die Dampfabzugskanäle abtransportiert.

Abfall getrennt werden und somit in die Umwelt gelangen.

Eine mögliche Alternative bieten flüssige Kohlenwasserstoffe. Sie verfügen über eine hohe Energiedichte und durch einfaches Wiederbefüllen weisen sie gegenüber Batterien nahezu keine Ladezeit auf. Durch einen miniaturisierten Verbrennungsprozess kann die chemisch gebundene Energie zur Versorgung von elektronischen Geräten nutzbar gemacht werden. Die hierbei frei werdende Wärmeenergie kann auf verschiedenen Wegen in elektrische Energie umgewandelt werden, man unterscheidet dabei grundsätzlich Systeme mit und ohne bewegliche Komponenten. Systeme mit beweglichen Komponenten wandeln die thermische Energie zunächst in mechanische und dann in elektrische Energie. In solchen Energiewandlern werden z.B. miniaturisierte Motoren, Gasturbinen oder piezoelektrische Elemente eingesetzt. Ohne bewegliche Teile kann die thermische Energie direkt in elektrische Energie gewandelt werden, beispielsweise über photovoltaische Zellen oder thermoelektrische Generatoren.

Ziel des vorgestellten Projektes ist die Entwicklung eines miniaturisierten Energiewandlers ohne bewegliche Teile. Die bei der Verbrennung eines flüssigen Brennstoffes frei werdende Wärmeenergie soll dabei unter Ausnutzung des Seebeck-Effektes mit einem thermoelektrischen Generator in elektrische Energie umgewandelt werden. Um eine vollständige Verbrennung in der Brenn-

kammer zu gewährleisten, wird eine Vorverdampfung des Brennstoffes in einem kapillar getriebenen Verdampfer vorgesehen. Die Funktionsweise des Mikronenergiewandlers ist in Abbildung 1 dargestellt.

Verdampfungs- und Kondensationskreislauf

Der Brennstoffverdampfer hat die Aufgabe, dampfförmigen Brennstoff für die Brennkammer bereitzustellen und den thermoelektrischen Generator zu kühlen, um für eine möglichst hohe, für die Energiewandlung günstige Temperaturdifferenz zu sorgen. Die in der Brennkammer generierte

Entschärfung der Entsorgungsproblematik

Batterien enthalten in der Regel Schwermetalle und andere für die Umwelt gefährdende Inhaltsstoffe. Zwar gibt es in Deutschland, anders als zum Beispiel in Schwellen- und Entwicklungsländern, ein gut ausgebautes Recyclingsystem für Batterien, jedoch lag dessen Recyclingquote 2007 nur bei 38 %. Die Brisanz dieses Themas zeigt sich in der EU-Richtlinie 2006/66/EG, die eine europaweite Sammelquote von nur 25 % bis 2012 einfordert. Verwendet man stattdessen Kohlenwasserstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zur Versorgung von elektronischen Kleingeräten, kann die Entsorgungsproblematik CO₂-neutral entschärft werden.

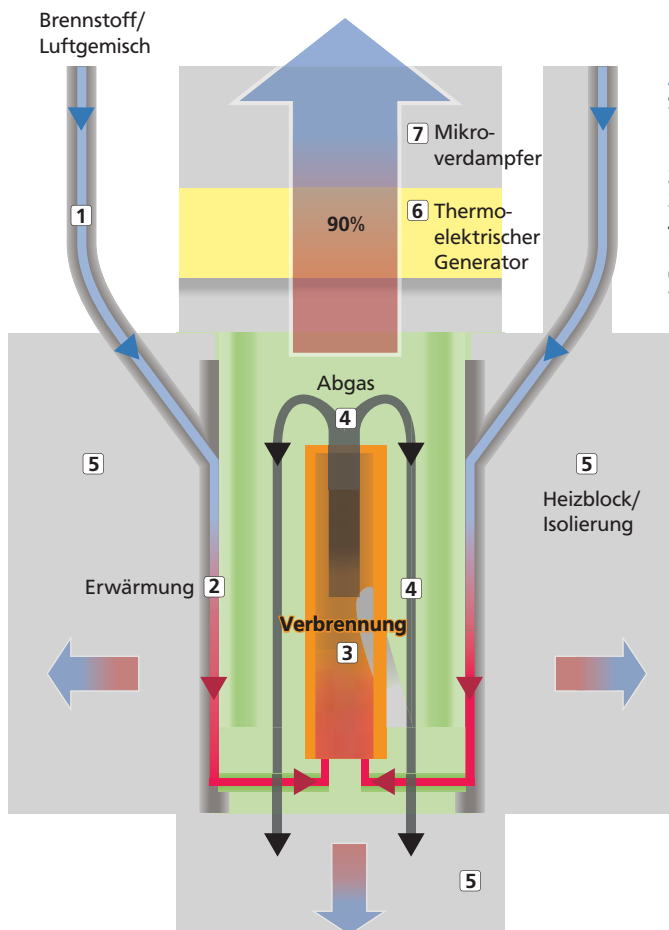


Abbildung 3

Schematischer Aufbau der Mikrobrennkammer mit Darstellung der Fluid- und Wärmeströme.

- 1) Brennstoff/Luftgemisch Zufuhr,
- 2) Erwärmung des Brennstoff/Luftgemisches,
- 3) Verbrennungszone mit katalytisch unterstützter Verbrennung,
- 4) Brennzonen umströmendes Abgas,
- 5) Heizblock/Isolierung,
- 6) Thermoelektrischer Generator,
- 7) Mikroverdamper.

Wärmeenergie wird dem Thermogenerator auf der heißen Seite zugeführt. Ein Teil der Wärme wird in elektrische Energie umgewandelt, der größte Teil der Wärme wird jedoch auf der kalten Seite des Generators von dem Verdampfer abtransportiert. Entsprechend der Differenz von Verdampfungsenthalpie (1100 kJ/kg) und Heizwert (19700 kJ/kg) von Methanol, setzt ein Gramm Methanol bei der Verbrennung etwa 18 Mal so viel Wärme frei, wie für dessen Verdampfung erforderlich ist. Auch wenn ein Teil der Wärme durch den Thermogenerator in elektrische Energie umgewandelt wird, übertrifft der aus der Verdampferstruktur austretende Dampfmassenstrom daher den für die Verbrennung erforderlichen um ein Vielfaches. Der für die Verbrennung nicht benötigte Teil des Dampfes wird durch einen Kondensator geleitet, rekondensiert und in flüssiger Form wieder dem Verdampfer zugeführt. Dieser interne Kreislauf entspricht in der Funktionsweise einem Wärmerohr (Heat Pipe) mit der Aufgabe, Wärme möglichst effizient abzutransportieren.

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Verdampfers in Form einer Explosionsdarstellung. Die Zufuhr von Flüssigkeit und Wärme zu der Kapillarstruktur wird von gegenüberliegenden Seiten realisiert, was kennzeichnend für einen Verdampfer ist, welcher nach dem Prinzip von umgedrehten Menisken arbeitet (inverted menisci type evaporator). Dieses Prinzip wird auch in einigen Wärmerohren eingesetzt und ermöglicht die Übertragung von sehr hohen Wärmeströmen. Ähnlich einem Lampendocht saugt die Kapillarstruktur während der Verdampfung das flüssige Methanol aus dem Brennstofftank an. Gleichzeitig sorgen die Kapillarkräfte dafür, dass in den Dampfzugskanälen ein höherer Druck aufgebaut wird, als in der Flüssigkeitskammer. Dieser Überdruck kann dazu genutzt wer-

- **Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik**

Dipl.-Ing. Thomas Kania, Tel.: 06151/16-5087
E-Mail: kania@csi.tu-darmstadt.de
www.rsm.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. habil. Andreas Dreizler, Tel.: 06151/16-2257
E-Mail: dreizler@csi.tu-darmstadt.de
www.rsm.tu-darmstadt.de

- **Fachgebiet Technische Thermodynamik**

M. Sc. Boris Schilder, Tel.: 06151/16-3559
E-Mail: schilder@ttd.tu-darmstadt.de
www.ttd.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Tel.: 06151/16-3159
E-Mail: pstephan@ttd.tu-darmstadt.de
www.ttd.tu-darmstadt.de

- **Fachgebiet Thermofluidik von Mehrphasenströmungen**

Prof. Dr. rer. nat. Steffen Hardt, Tel.: 06151/16-2581
E-Mail: hardt@csi.tu-darmstadt.de
www.nmf.tu-darmstadt.de

den, den für die Verbrennung benötigten Teil des Dampfes zu der Brennkammer und den überschüssigen Dampf zu dem Kondensator zu transportieren. Somit beruht der Fluidtransport auf Kapillarkräften und auf eine Pumpe kann verzichtet werden.

Brennkammer

In der Brennkammer findet die Oxidation des Brennstoffes statt, sie stellt die benötigte thermische Energie für den thermoelektrischen Umwandlungsprozess zur Verfügung. Während Verbrennungsprozesse in großskaligen Aufbauten relativ gut erforscht sind, liegen für sehr kompakte

oder gar Mikrobrennkammern bislang nur wenige Informationen vor. Die relativ kleinen Dimensionen der Brennkammer führen zu neuen Problemstellungen, die auf größeren Skalen eine untergeordnete Rolle spielen. Als wichtigster Punkt ist das hohe Oberflächen-Volumen Verhältnis zu nennen. Der Einfluss der Wandoberflächen in der Brennkammer ist nicht mehr zu vernachlässigen, sondern prägt das Verhalten des Systems. Erhöhte Wandwärmeverluste führen zu Verlöschungseffekten der Flamme. Auch Radikalverlöschungen, hervorgerufen durch die Interaktion des reagierenden Gemisches mit den Oberflächen, sind nicht mehr zu vernachlässigen. Um den Einfluss dieser Effekte zu

ANZEIGE

Verbindungen fürs Leben.

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Konzerngesellschaft der Royal BAM Group

Eschborner Landstraße 130-132
60489 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 79 29-0
Telefax: (069) 79 29-122
www.wf-ingbau.de

Seit 1875 steht die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG für innovative und herausragende, qualitative Ingenieurbauleistungen. Nicht ohne Grund zählt das Premium-Bauunternehmen deshalb zu den Top-Anbietern im weltweiten Markt.



Wayss & Freytag Ingenieurbau

minimieren und eine stabile Verbrennung zu gewährleisten, wurden verschiedene Maßnahmen getroffen, die im Einzelnen kurz erläutert werden. Zuerst wird die benötigte Methanolmenge aus dem Verdampfungs- und Kondensationskreislauf entnommen, mit Umgebungsluft gemischt und der Brennkammer zugeführt. Bei der konzeptionellen Auslegung der Brennkammer (Abb. 3) stand im Vordergrund, eine stabile Verbrennung zu gewährleisten und einen möglichst großen Anteil der thermischen Energie zum thermoelektrischen Generator 6) zu leiten. Dies ermöglicht einen hohen Wirkungsgrad der thermoelektrischen Energiewandlung. Hierzu umströmt das zugeführte Brennstoff-Luft-Gemisch 1) in einem Ringspalt die Brenn- und Abgaszone 2). Dieses dient zum Vorwärmen des Gemisches. Desweiteren isoliert diese Maß-

Erhöhung der Energiespeicherkapazität

Auf der Suche nach alternativen umweltfreundlichen mobilen Energiespeichern zeigen flüssige Kohlenwasserstoffe optimale Eigenschaften. Deren aufs Gewicht bezogene Energiespeicherkapazität entspricht in etwa dem 20-fachen heute gängiger Batterien bzw. Akkumulatoren. Selbst ein Mikroenergiewandler mit einem vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad könnte somit die Energieversorgung von mobilen Geräten deutlich verbessern.

nahme die Brennkammer an der umströmten Fläche nach außen. In der inneren Brennzone 3) führt ein Katalysator zu einer stabilisierenden katalytisch unterstützten Verbrennung. Das umgesetzte Brennstoff-Luft-Gemisch umströmt als heißes Abgas zusätzlich die innere Brennzone und wirkt somit Wärmeverlusten entgegen 4). In einem zukünftigen

ANZEIGE

über die A5*

Ob bei der Zementherstellung für Beton oder im Stahlwerk, Schenck Process Wäge- und Dosiersysteme sorgen für stabile Brücken.

Tiefkühl-Pizza*

Käse ist nicht gleich Käse. Schenck Process Dosiertechnik sorgt für die richtige Mischung und so für perfekte Pizzen und auch Pasta ...

Bling-Bling*

Damit es so richtig funkelt, braucht es natürlich einen Diamantring. Vom größten Kohlebrocken bis zum kleinsten Diamanten, Schenck Process Siebtechnik ist auch hier immer dabei.

nasse Haare*

Noch schnell für die Party zurechtgemacht – wer denkt schon beim Haareföhnen an uns? Aber – Schenck Process Systeme verwiegen und automatisieren auch in Kohlekraftwerken.

in den Feierabend*

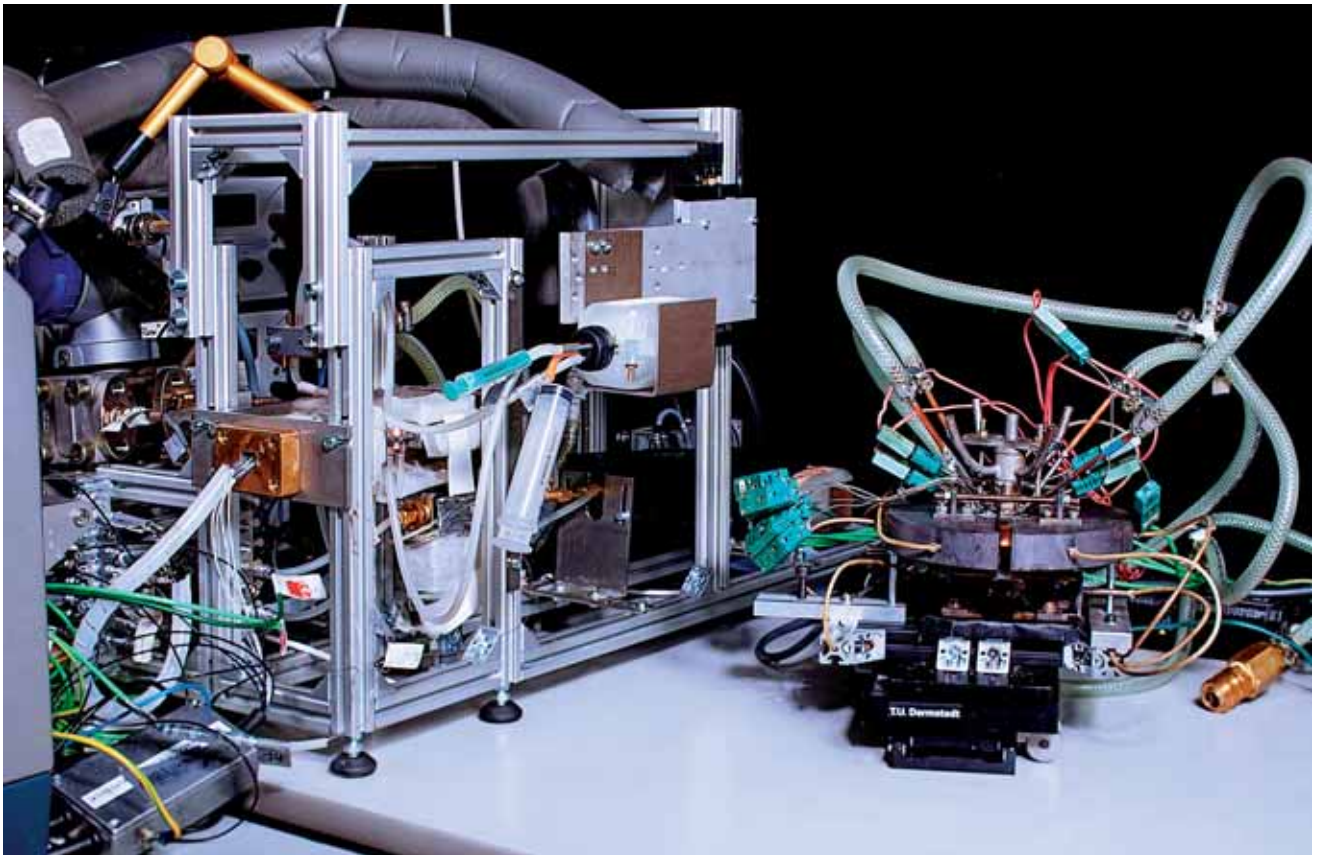
Feierabend! Jetzt nur noch mit dem Zug nach Hause. Oder zur nächsten Party. Diagnosesysteme von Schenck Process sorgen dafür, dass Sie sicher ankommen.



Überall, wo es etwas zu wiegen gibt, steckt Schenck Process dahinter.

Schenck Process GmbH, Pallaswiesenstr. 100, 64293 Darmstadt, Germany, T +49 61 51-15 31 22 39, humanresources@schenckprocess.com, www.schenckprocess.com





anwendungsnahen System sollen alle nicht funktionellen Seiten der Brennkammer mit einem isolierenden Material versehen werden, das der Stabilisierung und der gezielten Wärmestromführung dient. Im Laboraufbau wurde dies mit einem Heizblock realisiert, der definiert eine Umgebungstemperatur vorgibt 5).

Fazit

Die bisherigen Untersuchungen des Mikroenergiewandlers haben gezeigt, dass ein funktionsfähiges, zuverlässiges System ohne bewegliche Teile realisierbar ist. Zwar gibt es noch zu lösende Probleme, wie z.B. die Entwicklung einer geeigneten Verbrennungsluftzufuhr ohne bewegliche Teile, doch auch hier gibt es vielversprechende Ansätze. Die Verwendung eines thermoelektrischen Generators auf dem heutigen Stand der Technik ermöglicht einen Systemwirkungsgrad von ca. 5 %. Bezüglich der Energiedichte bedeutet dies, dass das System unter Verwendung von flüssigen Kohlenwasserstoffen mit den aktuellsten Batterien konkurrieren kann. Eine Effizienzsteigerung durch den Einsatz neuer derzeit noch in der Entwicklung befindlicher thermoelektrischer Module könnte zu einem deutlichen Vorteil gegenüber gängigen Batterien und Akkumulatoren bei einigen dezentralen oder mobilen Anwendungen führen. Hier wurden in den letzten Jahren insbesondere mit nanostrukturierten Materialien deutliche Fortschritte erzielt.

Abbildung 4

Versuchstand des Mikroverdampfers (links) und der Mikrobrennkammer (rechts) während der Voruntersuchungsphase.



Thomas Kania arbeitet seit 2006 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt. Sein Schwerpunkt liegt in der Entwicklung einer Mikrobrennkammer für den Mikroenergiewandler.



Boris Schilder arbeitet seit 2006 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Technische Thermodynamik. Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Entwicklung eines Verdampfers für den Mikroenergiewandler.



Steffen Hardt ist seit April 2009 Professor am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt und leitet dort das Fachgebiet Thermofluidik von Mehrphasenströmungen.



Peter Stephan ist Professor für Technische Thermodynamik im Fachbereich Maschinenbau und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces. Er forscht im Bereich der Wärme- und Stoffübertragung.



Andreas Dreizler ist seit 2008 Professor im Fachbereich Maschinenbau und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces. Er leitet das Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik.

Laserspektroskopie zur Untersuchung von Grenzschichten

Bei Austauschprozessen zwischen Gasen und umgebenden Wänden werden Energie, chemische Stoffkomponenten und Impuls übertragen. Für ein besseres Verständnis insbesondere auch in technischen Strömungen sind detaillierte experimentell gewonnene Informationen zu Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilungen im Bereich der Grenzschicht zwischen Fluid und Wand notwendig. Diese müssen möglichst störungsfrei mit hoher Zeit- und Ortsauflösung



bestimmt werden. Die Verwendung von Laserlicht als Messwerkzeug zeigt sich hier konventionellen invasiven Sensorkonzepten weit überlegen.

► Laser Spectroscopy for Boundary Layer Investigations

Fluid-wall interaction processes are characterised by the exchange of energy, mass and momentum. An improved understanding especially in flows of technical relevance needs reliable experimental information on distributions of temperature, chemical species concentrations and velocities. These quantities must be measured within the boundary layer between fluid and solid. Compared to conventional sensors, laser spectroscopic methods are superior because of their non-intrusiveness, temporal and spatial resolution.

Andreas Dreizler und Jan Brübach • Der Austausch von Energie, Masse und Impuls zwischen einer gasförmigen Strömung und einer umgebenden Wand tritt in einer Vielzahl technischer Strömungssysteme auf. Bei energie- oder verfahrenstechnischen Prozessen beeinflussen der Wärmeübergang sowie die Beschaffenheit der Wand den Ablauf der chemischen Reaktionen. Während bei katalytisch aktiven Oberflächen der Stoffumsatz beschleunigt wird, können bei anderen Oberflächen chemische Reaktionen gelöscht werden. Eine solche Löschung beispielsweise im Brennraum eines Ottomotors ist u. a. für die Primäremission gesetzlich limitierter Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO) verantwortlich. Da diese Prozesse aufgrund der steilen räumlichen Gradienten in unmittelbarer Wandnähe auf sehr kleinen Skalen stattfinden, sind für eine genaue Messung Methoden mit sehr hoher Raumauflösung notwendig, die den Prozess möglichst wenig stören. Hierfür eignen sich spektroskopische Messmethoden.



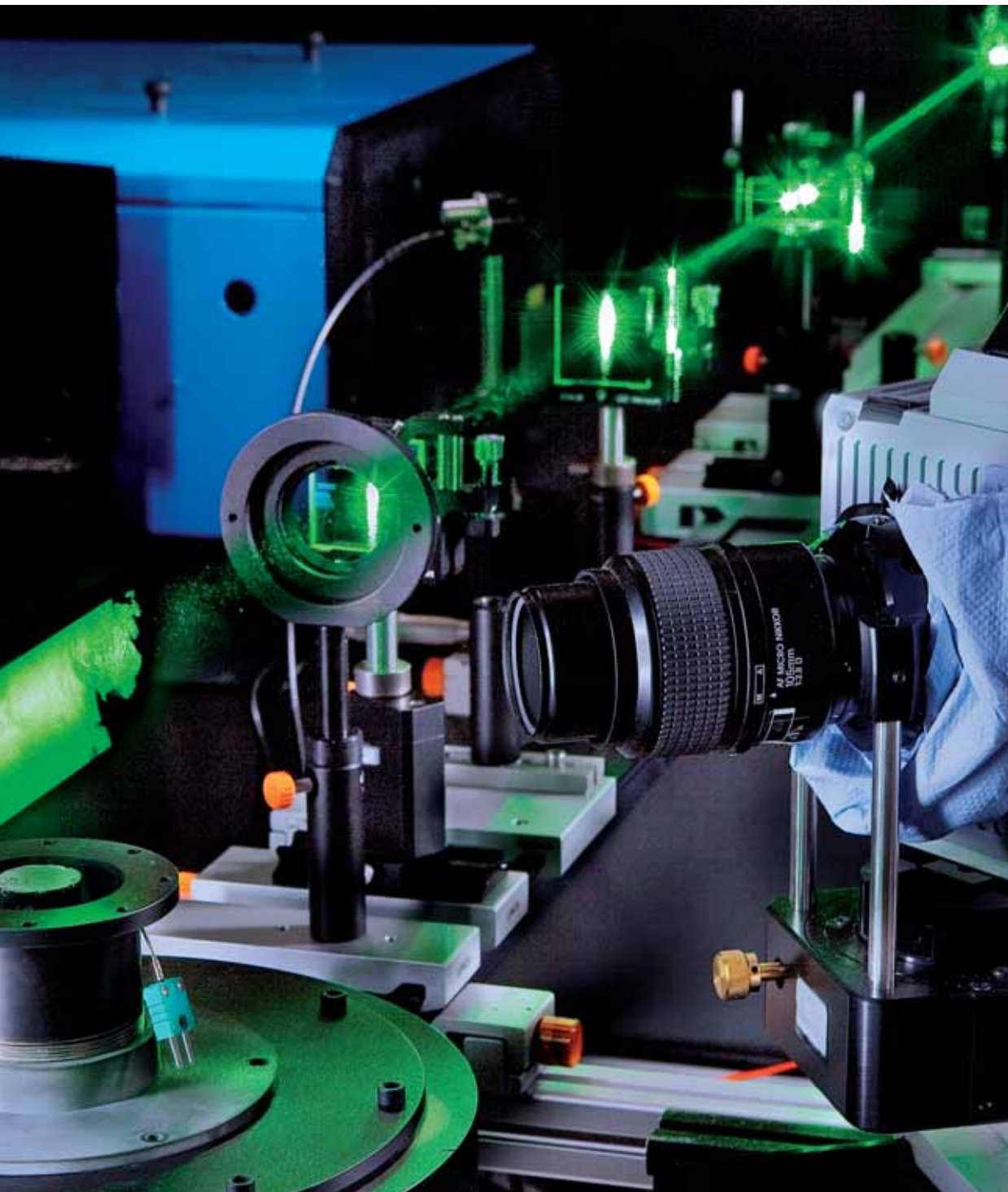


Abbildung 1
In ihrer Wellenlänge abstimmbare gepulste Laserstrahlung in Kombination mit hochempfindlichen CCD- und CMOS-Kameras bilden die Voraussetzung für den Einsatz spektroskopischer Messmethoden zur Untersuchung von Austauschprozessen zwischen Fluid und Wand.



Abbildung 2
Eine exakte Justage optischer Systeme ist vor jeder Messung notwendig.

Abbildung 3
Anhand von idealisierten Modellsystemen werden Austauschprozesse von Energie, Masse und Impuls zwischen gasförmiger Strömung und Wand untersucht. Die Fotografie zeigt beispielhaft eine Gasflamme, die in ihrem oberen Teil mit einer gekühlten Metalloberfläche in Wechselwirkung steht.

Dabei werden in Abhängigkeit des untersuchten Stoffsystems die Eigenschaften des eingestrahnten bzw. wieder emittierten (Laser-)Lichts verändert. Diese Änderung trägt Informationen über den momentanen Zustand des Stoffsystems in sich. Übertragen auf die Untersuchung von Strömungen in Wandnähe können damit z.B. die lokale Temperatur oder die Konzentration einer Gaskomponente gemessen werden. Durch die Nutzung sehr kurzer Laserpulse im Nanosekundenbereich können die kürzesten in dem Prozess auftretenden Zeitskalen aufgelöst werden. Damit werden Informationen über den momentanen Zustand gewonnen – ähnlich einer unverwackelten Fotografie eines dynamischen Prozesses.

Temperatur- und Konzentrationsmessung

Um den Austausch von Energie zwischen Gas und Wand zu verstehen, muss die Temperatur der Oberfläche und der angrenzenden Gasphase möglichst zeitgleich gemessen werden. Wandtemperaturen werden hier unter Nutzung „thermographischer Phosphore“ bestimmt. Solche Phosphore sind keramische Materialien, die in geringer Konzentration mit einem Übergangsmetall oder einer seltenen Erde „verunreinigt“ (dotiert) sind. Die zu ver-

Experiment und Simulation

Experimentelle Untersuchungen bilden die Basis, auf der komplexe Prozesse verstanden werden. Überführt in mathematische Modelle können sie im Rahmen numerischer Simulationen die Auslegung technischer Strömungssysteme auch unter Nutzung „intelligenter Grenzflächen“ deutlich verbessern. Dieses Ziel wird innerhalb des CSI durch intensive Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen verfolgt.

messende Oberfläche wird mit einem sehr dünnen Phosphorfilm beschichtet und mit einem kurzen UV-Laserpuls angeregt. Die Dauer der anschließend emittierten Lumineszenz ändert sich in Abhängigkeit der Temperatur. Nach einer Kalibration können somit berührungslos Oberflächentemperaturen mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Dieses Verfahren ist sehr robust und wurde von den Autoren bereits in praxisrelevanten Umgebungen wie Otto- und Dieselmotoren eingesetzt. Gastemperaturen sehr nahe an festen Oberflächen können mithilfe der kohärenten anti-Stokes Raman Spektroskopie (CARS) gemessen werden. Hierbei handelt es sich um einen nichtlinearen Wechselwirkungsprozess zwischen Licht und Gasmolekülen, hier molekularem Stickstoff. Bei der CARS ist die Temperaturinformation in der statistisch verteilten Besetzung unterschiedlicher Schwingungs- und Rotationszustände enthalten. Bei diesen Energiezuständen handelt es sich um innere Freiheitsgrade, die jedes Molekül aufweist. Dabei wird die Besetzung dieser Freiheitsgrade durch drei eingestrahelte Laserstrahlen erfasst, die auf ein wenige $10\mu\text{m}$ -großes gemeinsames Messvolumen fokussiert werden. Der in dem CARS-Prozess erzeugte Signalstrahl mit der darin enthaltenen Temperatur-



• Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik

Prof. Dr. habil. Andreas Dreizler, Tel.: 06151/16-2257
E-Mail: dreizler@csi.tu-darmstadt.de
www.rsm.tu-darmstadt.de

• Fachgebiet Energie- und Kraftwerkstechnik

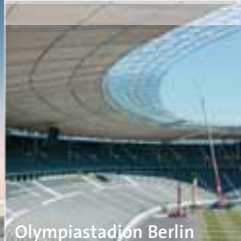
Dr.-Ing. Jan Brübach, Tel.: 06151/16-2502
E-Mail: bruebach@ekt.tu-darmstadt.de
www.ekt.tu-darmstadt.de

Mit Krebs und Kiefer die Zukunft bauen!



Businesspark Kiew

- **Mitarbeiten:** Nationale und internationale Projekte in den Bereichen: Hochbau, Ingenieurbau, Verkehrsanlagen, Geotechnik und Wasserbau
- **Weiterkommen:** Fachliche Herausforderungen, gute Fortbildungsmöglichkeiten, beste Aufstiegschancen
- **Teilhaben:** Outstanding Structure Award, Commerzbank-Arena Frankfurt • Deutscher Stahlbaupreis, Olympiastadion Berlin • 1. Preis Realisierungswettbewerb, Chemnitztalviadukt • RIBA Award, Photonikzentrum Berlin



Olympiastadion Berlin



Chemnitztalviadukt



NBS Köln – Rhein/Main



Photonikzentrum Berlin

KREBS UND KIEFER Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH • Hilpertstr. 20 • 64295 Darmstadt • Tel.: 06151 885-0 • www.kuk.de
Deutschland: Berlin - Darmstadt - Dresden - Erfurt - Freiburg - Karlsruhe - Koblenz - Leipzig • International: Algier - Kiew - Moskau - Skopje - Tunis

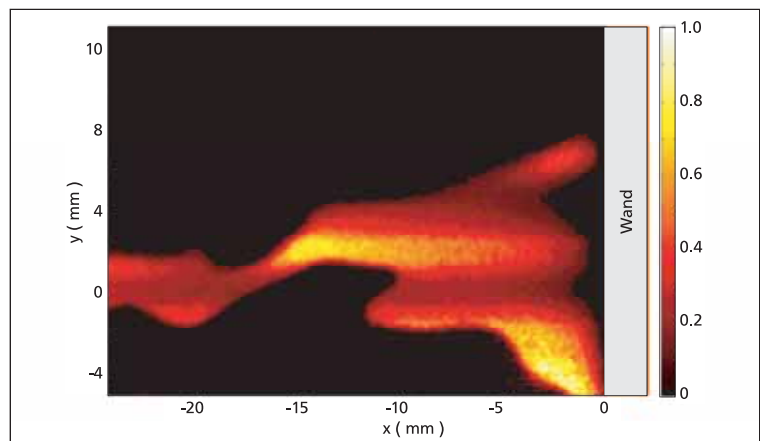
ANZEIGE

information wird in seine verschiedenen Spektralanteile zerlegt und mit einer CCD-Kamera nachgewiesen. Die Zeitauflösung einer Einzelmessung ist auf die Pulslänge der Laserstrahlung beschränkt, hier ca. 10 ns.

Für eine Charakterisierung des Stoffaustauschs zwischen Gas und Wandoberfläche werden die wandnahen Konzentrationen von chemischen Gas-Komponenten benötigt. Aufgrund der Vielzahl beschränkt man sich auf die Messung einiger weniger Schlüsselkomponenten. Hierzu zählen Radikale, die aufgrund ihrer hohen chemischen Reaktivität für eine sich selbst erhaltende Reaktion entscheidend sind, sowie Produkte bzw. unerwünschte Nebenprodukte. Beispiele für unerwünschte Nebenprodukte z.B. bei Verbrennungsprozessen sind gesetzlich limitierte Schadstoffe wie Kohlen- oder Stickstoffmonoxid. Stoffkonzentrationen bis in den sub-Prozent-Bereich können mit der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) gemessen werden. Einzelne Stoffkomponenten in der Strömung werden durch

Spektroskopie im Maschinenbau

Spektroskopie ist ein Sammelbegriff für Beobachtungsverfahren, die auf der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie beruhen. Spektroskopische Methoden werden vor allem in der Physik und physikalischen Chemie seit über 100 Jahren entwickelt und in vielfältiger Weise genutzt. Mit der Verfügbarkeit zuverlässiger Laser- und Kamerasysteme werden spektroskopische Methoden in einem weiten Spektralbereich vom Ultravioletten bis ins mittlere Infrarot zunehmend zur Untersuchung technischer Strömungssysteme auch in ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt. Die Vorteile gegenüber konventionellen Sensoren sind die Berührungslosigkeit sowie die hohe Zeit- und Ortsauflösung.



die Absorption von gepulster Laserstrahlung selektiv in einen höheren Energiezustand versetzt. Da dieser Zustand energetisch instabil ist, kehrt das angeregte Molekül unter Aussendung von Fluoreszenzlicht wieder in einen energetisch günstigeren Zustand zurück. In Kombination mit der selektiven Anregungswellenlänge wird anhand des Fluoreszenz-Emissionsspektrums eindeutig auf die Stoffkomponente zurückgeschlossen. Die Information über die Konzentration ist in der Fluoreszenzintensität enthalten, die in einer quantitativen Messung relativ zu einem Kalibrationsstandard bestimmt wird.

Beispiel Flamme-Wand-Wechselwirkungen

Bedingt durch die hohe ökologische und ökonomische Relevanz müssen technische Verbrennungsprozesse hinsichtlich Effizienz und Schadstoffemission weiter optimiert werden. Während die in der reinen Fluidphase ablaufenden gekoppelten physikalisch-chemischen Prozesse bereits recht umfangreich untersucht und verstanden sind, gibt es im Bereich der Flamme-Wand-Wechselwirkungen große

Abbildung 4

Zweidimensionale Schnittinformation durch die räumliche Verteilung von Hydroxyl-Radikalen. Gezeigt ist eine Momentaufnahme, die innerhalb weniger Nanosekunden mit der laserinduzierten Fluoreszenzmethode (LIF) sehr nahe an einer Wand gemessen wurde. Zonen hoher Hydroxyl-Radikale markieren die momentane Lage der Flamme.

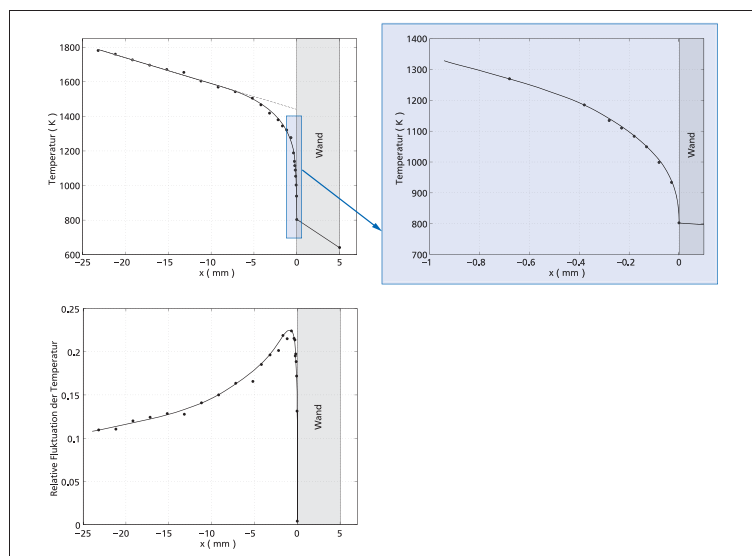


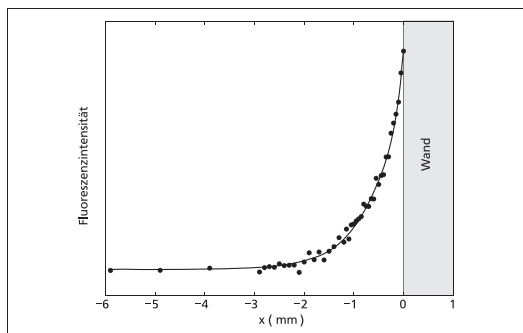
Abbildung 6

Wandnormale Temperaturverteilung gemessen mit der CARS-Methode innerhalb der Strömung sowie mit Hilfe der Phosphor-Thermometrie direkt auf der Wand. Mit kleiner werdendem Wandabstand reduziert sich die Gastemperatur aufgrund von Wärmeübertragung. Bei dem hier gezeigten Fall handelt es sich um ein turbulentes Flamme-Wand-System, weswegen ein hohes Fluktuationsniveau vorliegt. Die eingesetzten optischen Messmethoden ermöglichen eine störungsfreie Messung und eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung.

Wissenslücken. Ein zielgerichtetes Vorgehen besteht darin, in idealisierten Modellsystemen die zugrunde liegenden Prozesse zu erforschen. Die Anforderungen an solche idealisierte Systeme sind, dass die Randbedingungen z.B. bei den Ein- und Ausströmändern bekannt bzw. genau vermessen sind.

Abbildung 5

Mit Hilfe laser-induzierter Fluoreszenz (LIF) gemessene wandnormale Verteilung von Kohlenmonoxid (CO) in der Grenzschicht zwischen Gasflamme und gekühlter Wand. Bei Annäherung der im rechten Rand gezeigten Wand nimmt die CO-Konzentration stark zu. Dieses Verhalten wird mit der Flammlöschung durch die Wand in Verbindung gebracht.



Ein Beispiel für ein idealisiertes Flamme-Wand-System ist in der Abbildung 3 gezeigt. Hier brennt eine blau leuchtende Gasflamme senkrecht gegen eine horizontal ausgerichtete Metalloberfläche. Als Folge von Wärmeleitung in der Grenzschicht zwischen Gas und Wandoberfläche sowie der Rekombination von radikalischen Spezies an der Wand verlischt die Flamme bei Annäherung an die Wand. Dieser Zusammenhang ist in der Fotografie durch eine starke Abnahme des Flammluchtens erkennlich.

Werden mittels der oben erläuterten LIF-Methode Hydroxyl-Radikale in ihrer zweidimensionalen Verteilung gemessen, zeigt Abbildung 4 in einer Falschfarbendarstellung eine momentane Verteilung. Hohe Hydroxyl-Radikal Konzentrationen markieren die momentane Lage der Flamme. In diesem Beispiel liegen turbulente Strömungsverhältnisse

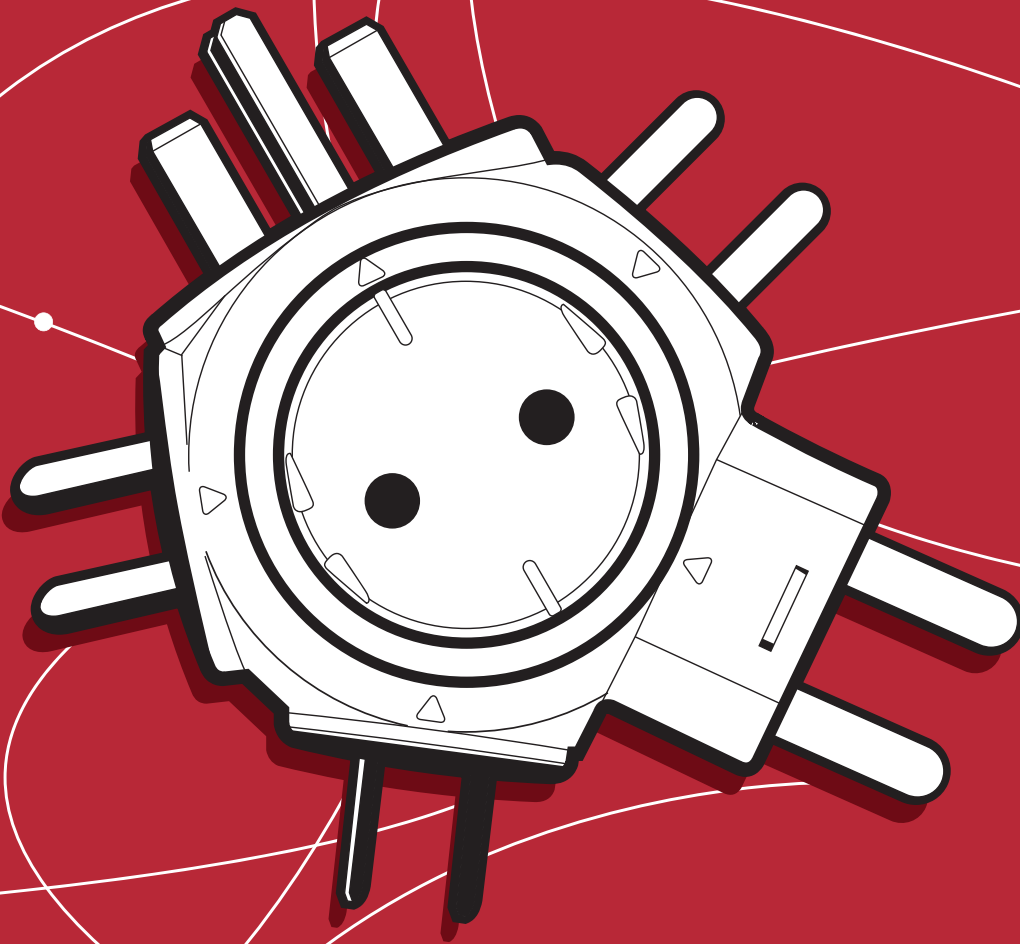
vor und die Hauptströmungsrichtung ist parallel zur Wandoberfläche orientiert. Deutlich erkennbar ist, dass aufgrund der Turbulenz die Flamme stark verwinkelt ist. Mit der Flammlöschung in Wandnähe geht ein unvollständiger Ausbrand einher. Dies ist in Abbildung 5 anhand eines Kohlenmonoxid-Profiles zu erkennen, das hier jedoch für eine andere Strömungsumgebung aufgenommen wurde, prinzipiell jedoch für alle Flamme-Wand-Systeme (ohne Katalysatorbeschichtung) beobachtet wird. Bei Annäherung an die Wand erhöht sich die Kohlenmonoxid-Konzentration, da die vollständige Reaktion hin zum Kohlendioxid teils unterbrochen wird und weniger Wärme freigesetzt wird. In Kombination mit hoher Wärmeübertragung vom Gas an die Wand bildet sich ein steiler Temperaturabfall zur Wand hin aus. Dies ist in Abbildung 6 für Mittelwert und Fluktuation in einer turbulenten thermischen Wandgrenzschicht erkennbar. Weiterführendes Ziel innerhalb des Exzellenz-Clusters „Smart Interfaces“ ist, die Austauschprozesse durch „intelligente Grenzflächen“ gezielt zu beeinflussen. Damit sollen insbesondere auch für chemisch reagierende Strömungen neue Potenziale zur Verbesserung technischer Systeme erschlossen werden.



Andreas Dreizler ist seit 2008 Professor im Fachbereich Maschinenbau und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces. Er leitet das Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik.



Jan Brübach leitet seit 2008 als Akademischer Rat das Laserlabor des Fachgebiets Energie- und Kraftwerkstechnik und arbeitet auf dem Gebiet wandnaher chemisch reagierender Strömungen.



> EIN JOB PASST IMMER ...

Jobs, Praktika, Stellen:
Hier findest Du alles!

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

Finde Deinen Job auf
www.stellenwerk-darmstadt.de

stellenwerk

*das Jobportal
der TU Darmstadt*

**Jetzt
neu!**

studentenwerk darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Mathematik macht Interfaces smarter

Die Forschung am Exzellenzcluster „Smart Interfaces“ erfolgt unter der Beteiligung vieler Disziplinen. Frei nach Josiah Willard Gibbs „Mathematics is also a language“ stellt dabei die Mathematik die Sprache bereit, mit der am CSI Wissen interdisziplinär kommuniziert werden kann. Die intensive Beteiligung der Mathematik umfasst dabei das volle Spektrum von mathematischer Modellierung über die Analysis hin zu numerischer Berechnung und Optimierung strömungsbasierter Prozesse. Gerade die Strömungsmechanik stellt bis heute eine spannende und anspruchsvolle Herausforderung für Mathematik und Ingenieurwissenschaften dar.



► Mathematics Makes Interfaces Smarter

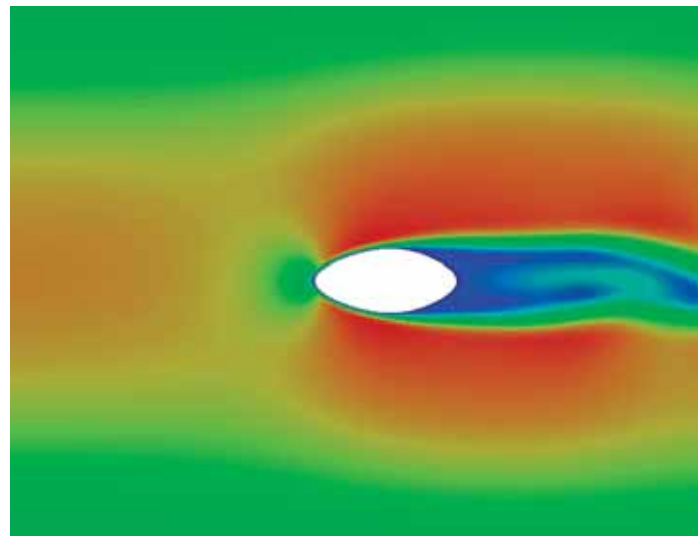
The research activities at the cluster of excellence “Smart Interfaces” are multi-disciplinary. Here mathematics provides an independent language for interdisciplinary communication - in agreement with Josiah Willard Gibbs: “Mathematics is also a language”. The involvement of mathematics at the CSI ranges from mathematical modeling via analysis up to numerical computation and optimization of flow based processes. Still today, especially fluid mechanics is an exciting challenge for both Mathematics as well as the Engineering Sciences.

Dieter Bothe, Reinhard Farwig, Matthias Hieber und Stefan Ulbrich • Im Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt wird intensiv an Modellen aus dem Bereich der Strömungsmechanik geforscht. In diesem Beitrag stellen wir einige dieser Aktivitäten vor, die direkt mit dem Center of Smart Interfaces verknüpft sind.

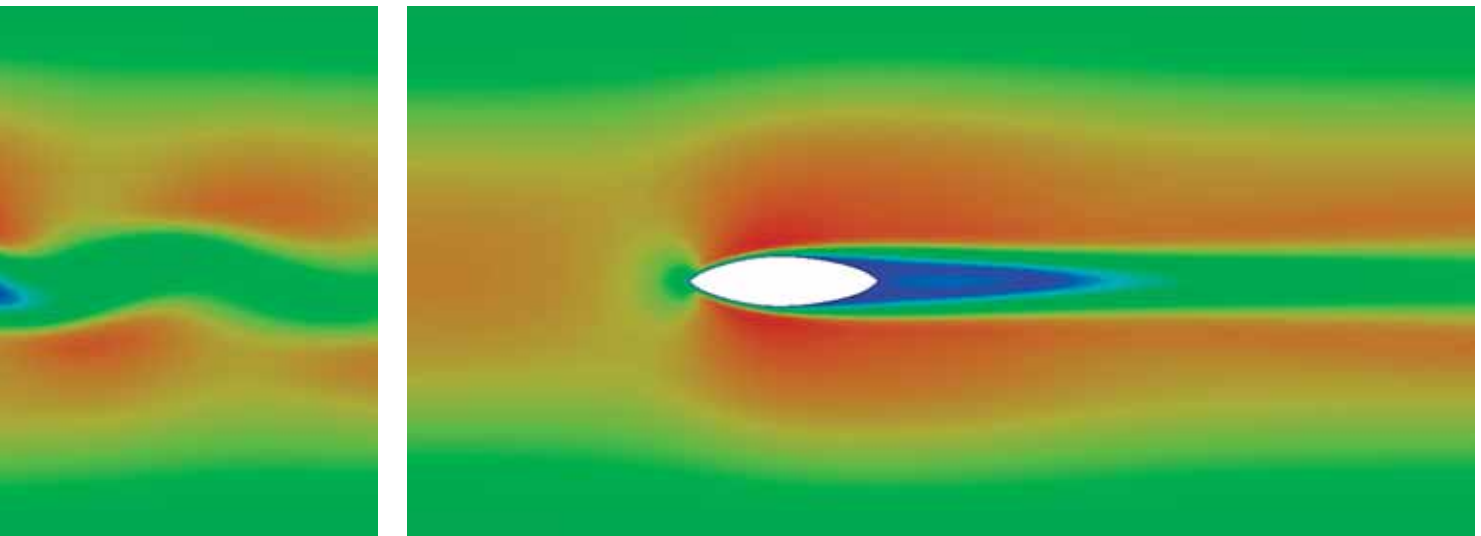
Wer wird Millionär?

Die Gleichungen von Navier und Stokes

Der Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783) stellte erstmalig Gleichungen für reibungslose Strömungen auf. Eine Modellierung reibungsbehafteter Strömungen gelang erst in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts dem französischen Ingenieur Henri Navier sowie dem englischen Mathematiker und Physiker Sir Gabriel Stokes. Navier stellte um 1822 – wenn auch mit falscher Argumentation – die richtigen Gleichungen auf. Unabhängig davon lieferte Stokes 20 Jahre später eine korrekte Herleitung. Die nach beiden benannten Gleichungen sind Grundlage aller laminaren und turbulenten Strömungsvorgänge Newton'scher Fluide wie z.B. Wasser.



Lösungen für diese Gleichungen sind seit den bedeutenden Arbeiten von Jean Leray (1934) und Eberhard Hopf (1950/51) bekannt. Allerdings ist die Frage, ob deren Lösungen physikalisch sinnvoll sind, also keine Singularitäten entwickeln, immer noch offen. Mit speziellen Methoden gelingt dieser Nachweis für kurze Zeitintervalle, aber trotz jahrzehntelanger Forschung und tiefgreifenden Ergebnissen über die Menge möglicher Singularitäten in Raum und Zeit bleibt die allgemeine Frage unbeantwortet und damit ein beständiger Ansporn für MathematikerInnen weltweit. In der Arbeitsgruppe von Professor Reinhard Farwig wurde gezeigt, dass eine solche Lösung unter Zusatzvoraussetzungen tatsächlich glatt ist. Interessant ist auch, dass diese Schwierigkeiten in Abbotts zweidimensionalem „Flatland“ nicht auftreten: Erst in drei Dimensionen kann es zu lokal stark schwankenden Richtungswechseln des Wirbelvektors im Raum kommen und die Wirbelstärke lokal über alle Maße wachsen. Aufgrund der herausragenden Bedeutung für die Analysis nichtlinearer partieller Differentialgleichungen und die Anwendungen in Numerik und Optimierung wählte das Clay Mathematics Institute diese seit 1934 offen gebliebene Fragestellung im Jahr 2000 als eines der sieben Millenniumsprobleme und lobte einen Preis von 1.000.000 US-Dollar für seine Lösung aus. (<http://www.claymath.org/millennium>)



Stelldichein der Phasengrenzen:

Das Problem der Kontaktlinie

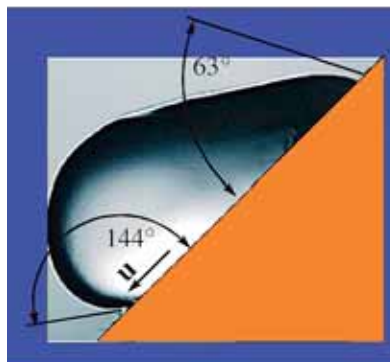
Zwar ist das Navier-Stokes-Problem allein schon schwierig genug, doch es wird noch spannender, wenn Flüssigkeiten auf Oberflächen treffen. So führt die mathematische Modellierung und Analyse vieler Beschichtungs- und Benetzungssphänomene unweigerlich auf freie Randwertprobleme und das Kontaktwinkelproblem für Fluide und Festkörper. Setzt man etwa einen Tropfen auf eine feste Oberfläche, so wird seine Form durch das Zusammenspiel von Schwerkraft, Oberflächenspannung und Kontaktwinkel bestimmt (Abb. 2). Das Verständnis der Kontaktlinie, d.h. der Linie an der Flüssigkeit, Luft und feste Oberfläche im Kontakt stehen, ist bis heute unvollständig. Der Fall einer sich bewegenden dynamischen Kontaktlinie ist noch weniger verstanden und stellt eine große Herausforderung dar: Die klassische Theorie besagt, dass eine viskose Flüssigkeit an festen Wänden haftet. Dies ist paradox: Die Kontaktlinie bewegt sich, aber die direkt benachbarte Flüssigkeit ist in Ruhe! Hier muss man die Haftbedingung geeignet abändern oder annehmen, dass der dynamische Kontaktwinkel

Abbildung 1

Minimierung des Reibungsbeiwerts durch Formoptimierung unter Geometrienebenbedingungen. Links: Anfangsgeometrie, Rechts: Optimale Geometrie

Abbildung 2

Dynamischer Kontaktwinkel eines Wassertropfens beim Abfließen auf einer schiefen Ebene aus Wachs.



nur die Verhältnisse in einiger Entfernung zum freien Rand richtig wiedergibt.

Die Mathematische Analysis leistet einen wichtigen Beitrag, um bei den Modellen die Spreu vom Weizen zu trennen. Selbst ganz ohne Kontaktlinie sind Strömungen mit freier Oberfläche und Grenzflächenspannung nur mit komplizierten Gleichungen zu beschreiben. Schon bei einem Wassertropfen bedeutet das Auftreten der deformierbaren Oberfläche eine starke Nichtlinearität, da kein Superpositionsprinzip mehr gilt und eine starke Rückkopplung auftritt: Die Geometrie der freien Oberfläche beeinflusst die Strömung im Inneren und damit wieder die eigene Evolution!

Probleme dieser Art werden an der TU Darmstadt auch im internationalen Graduiertenkolleg 1529 „Mathematical Fluid Dynamics“ gemeinsam mit der Waseda University in Tokio und der University of Tokyo mit mathematischen Methoden der Analysis, Stochastik, Geometrie und Optimierung untersucht. (<http://www.mathematik.tu-darmstadt.de/~igk/>)

Fliegender Seitenwechsel:

Transportprozesse an fluiden Grenzflächen

In mehrphasigen Prozessen ist die Phasengrenzfläche von herausragender Bedeutung für die Effizienz von Transport- und Transferprozessen. Dabei spielen geometrische Eigenschaften der Grenzfläche (wie Lage und Form), physikalische Ei-

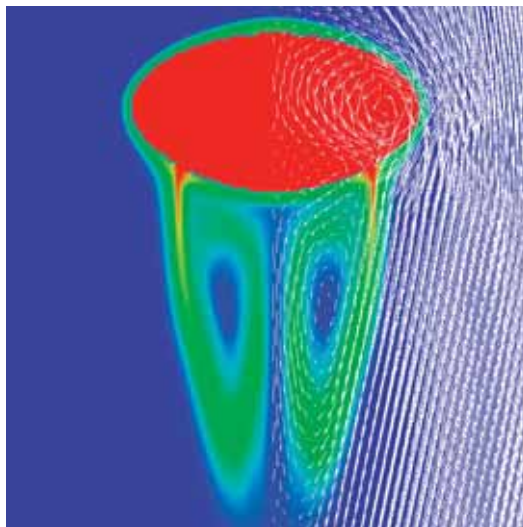


Abbildung 3
Mit einer erweiterten Volume-of-Fluid-Methode berechneter Stoffübergang von Sauerstoff aus einer im Wasser aufsteigenden Luftblase

genschaften (wie Grenzflächenspannung und -viskosität) sowie physiko-chemische Eigenschaften (wie durch eine Belegung der Grenzfläche veränderte Bedingungen) eine Hauptrolle. Die Eigenschaften der Interfaces beeinflussen wiederum die Transportvorgänge an und über die Phasengrenzfläche. Zur Intensivierung solcher Prozesse ist ein tiefgehendes Verständnis notwendig, das über eine qualitative Beschreibung deutlich hinausgeht. Exemplarisch betrachten wir Gas-Flüssig-Reaktionen als Grundlage für wichtige Prozesse der chemischen Industrie. Hier kommt eine der Komponenten aus Gasblasen und geht in die Flüssigkeit über, wo sie auf den Reaktionspartner trifft. Dafür müssen Gas und Flüssigkeit in engen Kontakt ge-



Dieter Bothe arbeitet als Professor für Mathematische Modellierung und Analysis am Center of Smart Interfaces und am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt.



Reinhard Farwig arbeitet als Professor für Analysis am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und ist Principal Investigator am CSI.



Matthias Hieber arbeitet als Professor für Analysis am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und ist Principal Investigator am CSI.



Stefan Ulbrich arbeitet als Professor für Nichtlineare Optimierung am Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt und ist Principal Investigator am CSI.

bracht werden, z.B. in Blasensäulen. Durch Auftrieb steigen Blasen in Flüssigphase auf, wobei Gasgehalt und Strömung sowie Form, Größe und Aufstiegsverhalten der Blasen wichtig sind. Hinzu kommen lokale Phänomene wie Konzentrations- und Wirbelschleppen. Tatsächlich stellt der Nachlauf jeder Blase einen Minireaktor dar. Die Güte und Geschwindigkeit der Vermischung bestimmen dabei die Ausbeute und die Qualität des Produktes.

Hier setzen moderne Simulationstechniken an, mit denen die Phasengrenzfläche in Form und Lage dreidimensional mit der vollen Dynamik erfasst wird. In Kombination mit effizienten Rechen-techniken erreicht man aktuell erstmals eine Direkte Numerische Simulation der realen Vorgänge, die ohne vereinfachende Annahmen auskommt. Dabei werden lokale Informationen aus dem Umfeld der Grenzfläche gewonnen, die experimentell nicht zugänglich sind (Abb. 3).

Trotz erster wichtiger Erkenntnisse ist noch viel zu tun, um ein tiefer gehendes Verständnis zu erzielen und mehr Rigorosität zu erreichen. Zu diesem Zweck hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft kürzlich das Schwerpunktprogramm 1506 eingerichtet, das von Professor Dieter Bothe von der TU Darmstadt zusammen mit Arnold Reusken (RWTH Aachen) koordiniert wird.

(<http://www.mma.tu-darmstadt.de>)

Alles unter Kontrolle!

Optimale Steuerung von Strömungen

Die Modellierung und Simulation von Strömungen mit Grenzschichten eröffnet die Möglichkeit, Prozesse gezielt zu optimieren – die Grenzschicht also „smart“ zu gestalten. Dies ist für viele Anwendungen bedeutsam, etwa bei der Beeinflussung von Strömungsgrenzschichten zwecks Reibungsverminderung, der optimalen Steuerung von Beschichtungsprozessen oder zur gezielten Kontrolle von Benetzungsvorgängen durch Optimierung äußerer Kräfte (z.B. electrowetting) oder der Oberflächengeometrie.

Den Schlüssel zur effizienten Optimierung solcher Prozesse stellen moderne Verfahren der mathematischen Optimierung und optimalen Steuerung dar. Diese haben zum Ziel, das Minimum einer Zielfunktion unter Nebenbedingungen durch ausgeklügelte Updates der Optimierungsparameter in wenigen Iterationen zu finden. Durch intensive

Bilanzierung mehrphasiger Systeme

Mathematische Modelle basieren oft auf der Bilanzierung physikalischer Größen wie Masse, Impuls oder Energie. Dabei führt man Buch über die zeitlichen Veränderungen in einem Kontrollvolumen (Abb. 4), die durch Transport über den Rand sowie durch Quellen oder Senken innerhalb des Volumens verursacht werden. An Phasengrenzen springen die Stoff- und Transportkoeffizienten und auch in der Grenzfläche selbst können Transportprozesse sowie Quellen oder Senken wirksam sein. Um aus den resultierenden Bilanzgleichungen vollständige Modelle zu erhalten, ist das Materialverhalten zu erfassen. Diese anspruchsvolle Aufgabe gelingt nur in enger Zusammenarbeit mit den Natur- und Ingenieurwissenschaften.

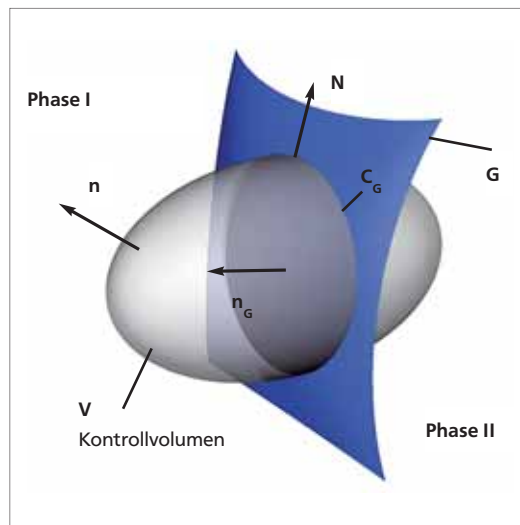


Abbildung 4
Kontrollvolumen, das von einer Phasengrenze (blau) geschnitten wird.

Forschung ist es für viele Anwendungen, z. B. die Formoptimierung umströmter Körper (Abb. 1), heute möglich, die Optimierung unabhängig von der Zahl der Variablen mit nur wenigen Simulationen durchzuführen. Dies gelingt durch Kombination ausgefeilter Techniken: die simultane Berechnung von Ableitungen nach den Parametern, die Verwendung von Multilevel-Approximationen und den Einsatz strukturangepasster Optimierungsverfahren.

Die Optimierung von Grenzschichten, freien Randwertproblemen und Benetzungsvorgängen ist weit weniger entwickelt. Dies liegt an der äußerst komplexen Modellierung und numerischen Simulation. Die Erarbeitung von Optimalitätsbedingungen, effizienten Ableitungsberechnungen und weiteren Zutaten für effizientes Optimieren ist eine spannende Aufgabe, die am CSI angegangen wird. Auch sollen echtzeitfähige Optimalsteuerungsverfahren zur Stabilisierung von Grenzschichten entwickelt werden. Hier wurden in Simulation und Experiment bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt.

Die Optimierung von Strömungen wird an der TU Darmstadt von Professor Stefan Ulbrich in mehre-

ren Verbundprojekten untersucht, unter anderem dem SFB 568 Strömung und Verbrennung in zukünftigen Gasturbinenbrennkammern, dem SPP 1253 Optimierung mit partiellen Differentialgleichungen und dem IGK 1529.

(<http://www.opt.tu-darmstadt.de>)

• Mathematical Modeling and Analysis

Center of Smart Interfaces

Prof. Dr. Dieter Bothe, Tel.: 06151/16-2256

E-Mail: bothe@csi.tu-darmstadt.de

www.mma.tu-darmstadt.de

• Arbeitsgruppe Analysis

Prof. Dr. Reinhard Farwig, Tel.: 06151/16-2787

E-Mail: farwig@mathematik.tu-darmstadt.de

www.mathematik.tu-darmstadt.de/fbereiche/analysis/pde/

• Angewandte Analysis

Prof. Dr. Matthias Hieber, Tel.: 06151/16-2287

E-Mail: hieber@mathematik.tu-darmstadt.de

www.mathematik.tu-darmstadt.de/fbereiche/analysis/aaa/

• Nichtlineare Optimierung

Prof. Dr. Stefan Ulbrich, Tel.: 06151/16-2487

E-Mail: ulbrich@mathematik.tu-darmstadt.de

www.opt.tu-darmstadt.de

ANZEIGE

INNOVATIVE
TECHNOLOGIE
WELTWEIT

KNF

NEUBERGER

MEMBRANPUMPEN- TECHNOLOGIE VOM FEINSTEN...

■ Ob für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten – KNF Neuberger bietet ein breites Angebot an Pumpen und Systemen.

■ Für unverfälschtes Fördern, Dosieren, Komprimieren und Evakuieren.

■ Als OEM- oder tragbare Ausführungen.

■ Mit einem variablen Produktprofil für kundenspezifische Lösungen.

... für anspruchsvolle Anwendungen – z.B. in den Bereichen:

- Medizintechnik
- Analysetechnik
- Verfahrenstechnik
- Lebensmitteltechnik
- Reprotechnik
- Energietechnik
- Forschung

www.knf.de

KNF Neuberger GmbH ■ Alter Weg 3 ■ D 79112 Freiburg
Tel. 07664/5909-0 ■ Fax 07664/5909-99 ■ E-Mail info@knf.de

BESUCHEN SIE UNS AUF DER COMPAMED 2009
HALLE 8a, STAND H 04

Turbulenzen unter Kontrolle bringen



Die Vorhersage und Kontrolle turbulenter Strömungen stellt eines der größten ungelösten Probleme der klassischen Physik dar. Gleichzeitig bietet Turbulenzkontrolle die ökonomisch und ökologisch hoch interessante Möglichkeit Energie effizienter zu nutzen. Am Center of

Smart Interfaces werden interdisziplinäre Ansätze genutzt, um eine Brücke zwischen diesen Gebieten zu schlagen und Ergebnisse der Grundlagenforschung für die praktische Anwendung zur Verfügung zu stellen.

► *Bringing Turbulences Under Control*

Predicting and Controlling Turbulence remains one of the unsolved problems in classical physics. At the same time, turbulence control offers the economically and ecologically interesting possibility to use energy more efficiently. At the Center of Smart Interfaces interdisciplinary research is carried out to bridge this gap and make results of fundamental research available for practical applications.

Bettina Frohnafel und Jovan Jovanović • Strömungen sind ein wichtiger Bestandteil unseres Lebens: Atemluft strömt durch Mund und Nase, Blut durch unsere Adern, der Wind pfeift uns an stürmischen Tagen um die Ohren und wir nutzen flüssigen Brennstoff, der in eine Verbrennungskammer strömt, um unsere Wohnungen zu heizen und uns fortzubewegen. Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwischen zwei Strömungszuständen – laminar und turbulent. Öffnet man einen Wasserhahn nur ein wenig, so strömt Wasser in einem glatten Strahl aus. Eine solche Strömung ist laminar. In diesem Fall bewegen sich alle Fluidteilchen gleichförmig in nebeneinander liegenden „Lamellen“. Wird der Wasserhahn weiter geöffnet, beginnt der Strahl sich zu winden und die glatte Oberfläche verschwindet. Die Strömung ist turbulent geworden und benachbarte Strömungsschichten vermengen sich miteinander.



Dies geschieht generell wenn die Strömungsgeschwindigkeit einen gewissen Grenzwert überschreitet. Ein Großteil der wissenschaftlich und technisch interessanten Strömungen ist turbulent. Solche Strömungen sind durch räumlich und zeitlich stark schwankende Fluidbewegungen gekennzeichnet, in denen Wirbel unterschiedlichster Größen zu finden sind.

Die Schwierigkeit der mathematischen Behandlung turbulenter Strömungen liegt dabei darin, dass zwar wohlbekannte Gleichungen vorhanden sind, die eine Strömung beschreiben (Navier-Stokes-Gleichungen), eine analytische Lösung dieser Gleichungen für turbulente Strömungen aber nicht möglich ist. Um dennoch eine Beschreibung der hochkomplexen turbulenten Strömung mit ihrer Vielzahl von Wirbelstrukturen zu ermöglichen, kommen statistische Techniken zum Einsatz. Dabei wird

das Strömungsfeld durch einen Mittelwert und die Abweichung von diesem Mittelwert erfasst. Da in den gemittelten Gleichungen mehr unbekannte Größen als Gleichungen vorhanden sind (Schließungsproblem der Turbulenz), ist die Vorhersage der Mittelwerte nur durch den Einsatz von Turbulenzmodellen möglich. Diese enthalten in mehr oder weniger

- **Drag and Circulation Control
Center of Smart Interfaces**

Dr.-Ing. Bettina Frohnäpfel, Tel.: 06151/16-6205
E-Mail: frohnaepfel@csi.tu-darmstadt.de
[www.csi.tu-darmstadt.de/staff/
mitarbeiterdetails_5862.en.jsp](http://www.csi.tu-darmstadt.de/staff/mitarbeiterdetails_5862.en.jsp)

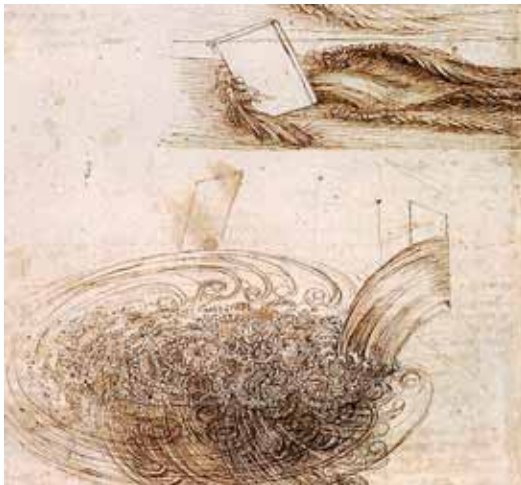
- **Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Universität Erlangen**

PD Dr. Jovan Jovanović, Tel.: 09131/85-29507
E-Mail: jovan.jovanovic@lstm.uni-erlangen.de
www.lstm.uni-erlangen.de

Abbildung 1

Für die Luftfahrt bedeutet erfolgreiche Reibungsminderung, dass die gleiche Strecke mit weniger Treibstoff zurückgelegt werden kann. Damit wären Langstreckenflüge über größere Distanzen möglich und der CO₂-Ausstoß pro Passagierkilometer würde reduziert.

Abbildung 2
Zeichnung einer turbulenten Strömung von Leonardo da Vinci. In turbulenten Strömungen entstehen Wirbel unterschiedlicher Größe. Die Vorhersage von turbulenten Strömungen gilt als eines der großen ungelösten Probleme der klassischen Physik.



Strömungswiderstände

Die Widerstandskraft, die ein umströmter Körper erfährt, ergibt sich aus der Summe verschiedener Einflussfaktoren. Neben dem dominierenden Reibungswiderstand treten an einem Flugzeug zusätzlich induzierter Widerstand, Interferenzwiderstand und Druckwiderstand auf. Erster entsteht durch den Druckausgleich am Körperend, da aufgrund des Auftriebs über und unter dem Flugzeug unterschiedliche Drücke herrschen. Der Interferenzwiderstand tritt an der Schnittstelle von Tragflügel und Flugzeugrumpf auf und Druckwiderstand entsteht immer dann wenn die Strömung der Körpergeometrie nicht folgen kann und es dadurch zu Verwirbelungen kommt, wie man sie im Regen hinter Autos beobachten kann.

großem Umfang empirische Elemente, so dass die Vorhersage einer turbulenten Strömung nur beschränkt durchgeführt werden kann.

Die Entwicklung numerischer Techniken in den letzten Jahrzehnten hat für diese Problemstellung enorme Fortschritte gebracht, da sie es ermöglichen, Supercomputer zur direkten Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen einzusetzen, ohne dass statistische Techniken und Turbulenzmodelle benötigt werden. Diese Vorgehensweise wird als Direkte Numerische Simulation (DNS) bezeichnet. Auch wenn für die Praxis interessante Strömungen für die heutige Rechenleistung nach wie vor eine große Herausforderung darstellen, sind hier in Zukunft durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von

Supercomputern und mathematischen Techniken große Fortschritte zu erwarten. Bereits heute lassen sich die vorhandenen DNS Ergebnisse nutzen, um in Kombination mit mathematischen Werkzeugen wichtige Erkenntnisse für grundlegende Fragestellungen im Ingenieurwesen zu erhalten.

Eine der zentralen Fragestellungen ist dabei die Minimierung der Energieverluste in turbulenten Strömungen. In der Nähe einer Wand wird jede Strömung abrupt abgebremst und überträgt dabei einen großen Teil ihres Impulses an den festen Körper. Diese „Reibung“ zwischen Fluid und Festkörper führt nicht nur dazu, dass sich die Strömungsgeschwindigkeit verringert, sondern auch dazu, dass der Körper eine rückwärtsgerichtete Kraft er-

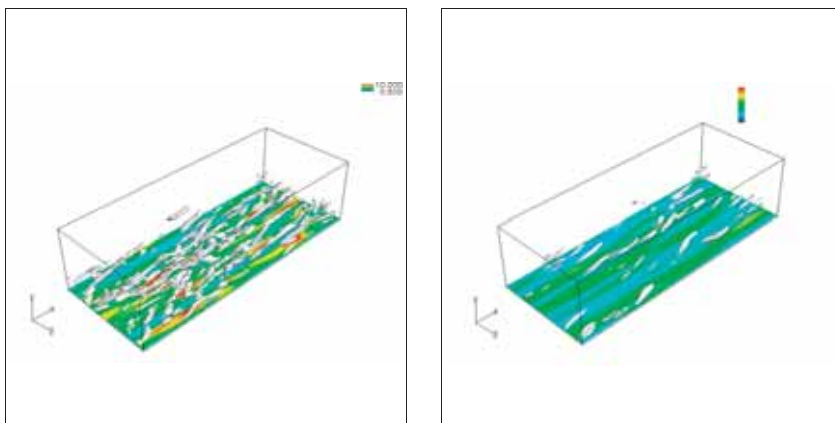


Abbildung 3

Visualisierung einer turbulenten Strömung in der Nähe einer Wand. Die grauen Strukturen stellen die charakteristischen Wirbel einer turbulenten Strömung dar. Im linken Bild ist eine unkontrollierte Strömung zu sehen, in der viele Wirbel zu finden sind. Das rechte Bild zeigt eine kontrollierte Strömung, wie sie durch spezielle Strukturen in der Oberfläche realisiert werden kann. Die Anzahl der Wirbel ist deutlich niedriger. Die Farbcodierung kennzeichnet die Reibung zwischen Fluid und Wand. Rot entspricht dabei einer hohen Reibung, so dass es in diesen Bereichen zu vermehrten Energieverlusten kommt. Die Reibung in der linken Strömung ist deutlich größer als im rechten kontrollierten Fall.

fährt, die wir als Strömungswiderstand wahrnehmen. Generell führen die Verwirbelungen in turbulenten Strömungen dazu, dass ständig neues Fluid in die Nähe der Wand kommt, so dass die Impulsübertrag an der Wand und die daraus resultierende Widerstandskraft sehr groß ist.

Dieser Reibungswiderstand bildet etwa 50 % des gesamten Strömungswiderstandes an einem Flugzeug oder Schiff. Bei Unterwassergefährten beträgt der Anteil 65–90 % und in Ölpipelines bis zu 100 %. Daher ist der wandnahe Impulsverlust in turbulenten Strömungen ein wichtiger Faktor, der den Kraftstoffverbrauch von Flugzeugen, die Pumpenergie in Ölpipelines oder die Geschwindigkeit des Hoch-

leistungsschwimmers mit bestimmt. Gelingt es durch gezielte Kontrolle der turbulenten Strömung eine Verringerung des Reibungswiderstandes zu erreichen, so kann dies dem Höchstleistungsschwimmer nur wenige (aber entscheidende) hundertstel Sekunden bringen und auf dem Transportsektor weltweit ein Einsparungspotential von mehreren Milliarden Euro haben sowie eine wesentliche Reduzierung der Umweltbelastung ermöglichen.

Die Gruppe „Drag and Circulation Control“ am „Center of Smart Interfaces“ beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie eine solche Reibungsminderung realisiert werden kann. Das Haupt-

ANZEIGE

Innovation ist unsere Leidenschaft



Diehl Aerospace ist der führende deutsche Anbieter für Avioniksysteme und Beleuchtungskonzepte in der Luftfahrtindustrie.

Die stetige Suche nach Verbesserungen und die enge Zusammenarbeit mit unseren Partnern sind dabei die Wegbereiter unseres Erfolgs. Und natürlich unsere Passion für die Luftfahrt.

Lassen auch Sie sich begeistern.

DIEHL
Aerosystems

A Joint Diehl Thales Company

www.diehl-aerospace.de

DIEHL

Aerospace



Abbildung 4
Die Haut eines Haies unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Auf den Hautschuppen sind feine in Strömungsrichtung ausgerichtete Strukturen zu erkennen.

augenmerk liegt dabei auf dem Mechanismus der Energieübertragung. In turbulenten Strömungen erhalten die größten Wirbel Energie aus der Hauptströmung. Die großen Wirbel zerfallen in immer kleinere bis an den kleinsten vorhandenen Wirbeln eine Umwandlung der kinetischen Energie in Wärme erfolgt. Dieser Abfluss von Energie aus der Hauptströmung über die Kaskade der turbulenten Wirbel entspricht der Energiedissipation durch Turbulenz. Diese turbulente Dissipation steht in direkter Relation zum Reibungswiderstand. Die Strömung muss also so verändert werden, dass die turbulente Dissipation möglichst klein wird.

Um heraus zu finden, wie eine solche Veränderung realisiert werden kann, kommt die angesprochene Kombination von Direkten Numerischen Simulationen mit mathematischen Werkzeugen zum Einsatz. Hierbei werden die Geschwindigkeitsfluktuationen der turbulenten Strömung im sogenannten „Anisotropie-Invariantenraum“ abgebildet. Generell können Geschwindigkeitsfluktuationen in allen drei Raumrichtungen auftreten. Im Invariantenraum werden diese in ein Verhältnis zueinander übertragen. Wenn beispielsweise alle drei Fluktuationen im Mittel die gleiche Intensität aufweisen, spricht

man von isotroper Turbulenz, andernfalls von anisotroper Turbulenz. Die Analyse von DNS Daten in Kombination mit theoretischen Betrachtungen im Invariantenraum führt zu dem Ergebnis, dass Turbulenz in Wandnähe in Richtung eines stark anisotropen Zustandes gezwungen werden muss, um ein Minimum der turbulenten Dissipation und somit Reibungsminderung zu erreichen.

Um dieses Ergebnis in praktische Anwendungen übertragen zu können, werden am Center of Smart Interfaces Untersuchungen durchgeführt, mit welcher Art von Grenzfläche zwischen Feststoff und Fluid ein solch anisotroper Turbulenzzustand in Wandnähe realisiert werden kann. Dazu werden beispielsweise Mikronuten in die Oberfläche eingebracht, innerhalb derer sich nur Geschwindigkeitsfluktuationen in Strömungsrichtung ausbilden können. Dadurch entsteht ein stark anisotroper Turbulenzzustand innerhalb der Nuten. Ein ähnliches Prinzip ist auch auf der Haut von Haien zu finden. In Windkanalexperimenten lässt sich die Reibungsminderung bestimmen, die mit solchen Strukturen erzielt werden kann. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit den Mikronuten Reibungsminderungen erzielt werden können, die über den bisher bekannten Werten für andere Oberflächenstrukturen liegen.

In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus dem Bereich der Fertigungstechnologie werden am Center of Smart Interfaces diese Oberflächenstrukturen weiter entwickelt, so dass Fortschritte im Verständnis wandnaher Turbulenz langfristig genutzt werden können, um Reibungsminderungen und Energieeinsparungen in verschiedensten Ingenieurbereichen zu realisieren.



Bettina Frohnapfel leitet gemeinsam mit Sven Grundmann die Nachwuchsforschergruppe Drag and Circulation Control am Center of Smart Interfaces.



Jovan Jovanović ist Fellow am Center of Smart Interfaces. Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen leitet er eine Forschungsgruppe zur Physik der Turbulenz und Turbulenzmodellierung.

EnBW – Jobs voller Energie. Und wie groß ist Ihr Energiebedarf?

EnBW Energie Baden-Württemberg AG – dahinter stehen ca. 20.000 Mitarbeiter, die sich für Strom, Gas und energienahe Dienstleistungen stark machen. Heute sind wir Deutschlands drittgrößtes Energieversorgungsunternehmen und nutzen auch in Mittel- und Osteuropa unsere Chancen.

Begegnen Sie mit uns gemeinsam den Herausforderungen des Energiemarkts. Wir suchen Menschen, die Impulse aufnehmen, aber auch Impulse geben.

Wir freuen uns auf Ihre energiegeladene Bewerbung!

Mehr Informationen unter:

www.enbw.com/karriere



EnBW

Energie
braucht Impulse

Plasma zur Strömungskontrolle

Plasma – der vierte Zustand der Materie. Mit Hilfe von Hochspannung lässt sich Luft ionisieren und in einen hochenergetischen Zustand versetzen. Wie man damit Strömungen an Oberflächen beeinflussen und dadurch den Reibungswiderstand von Flugobjekten reduzieren kann, damit beschäftigt sich eine Forschergruppe am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt.

► Plasma – The Fourth State of Matter

By means of high voltage, air can be ionized and shifted into this high-energy condition. How one can affect fluid boundaries to reduce frictional drag of bodies in flight is investigated by a group of researchers at the Center of Smart Interfaces at TU Darmstadt.

Sven Grundmann, Alexander Duchmann, Katrin Barckmann und Armin Kurz • Aktuelle Untersuchungen am Windkanal der TU Darmstadt befassen sich mit der aktiven Beeinflussung so genannter Grenzschichten. Diese Grenzgebiete bilden sich immer dann aus, wenn ein fester Körper in einem Fluid bewegt wird. Da die Fluidteilchen direkt an der Wand über die Haftbedingung genauso wie die Wandmoleküle in Ruhe sein müssen, bildet sich zwischen der Wand und der freien Strömung eine schmale Zone aus, welche durch große Geschwindigkeitsunterschiede geprägt ist.

Die meisten strömungsmechanischen Probleme lassen sich auf Ereignisse in oder Eigenschaften der Grenzschicht zurückführen. Zum Beispiel sind der Widerstand und der Auftrieb, welche ein Körper im umströmenden Fluid erfährt, in starkem Maße von den Vorgängen in den Grenzschichten abhängig. Man unterscheidet laminare Grenzschichten, in welchen die Fluidmoleküle sich auf gleichförmigen, parallelen Bahnen bewegen, von so genannten turbulenten, in denen chaotische Bewegungen vorherrschen. Die damit verbundene Durchmischung des Fluids nahe der Wand erhöht die Reibung drastisch und führt zu einem gesteigerten Energie-

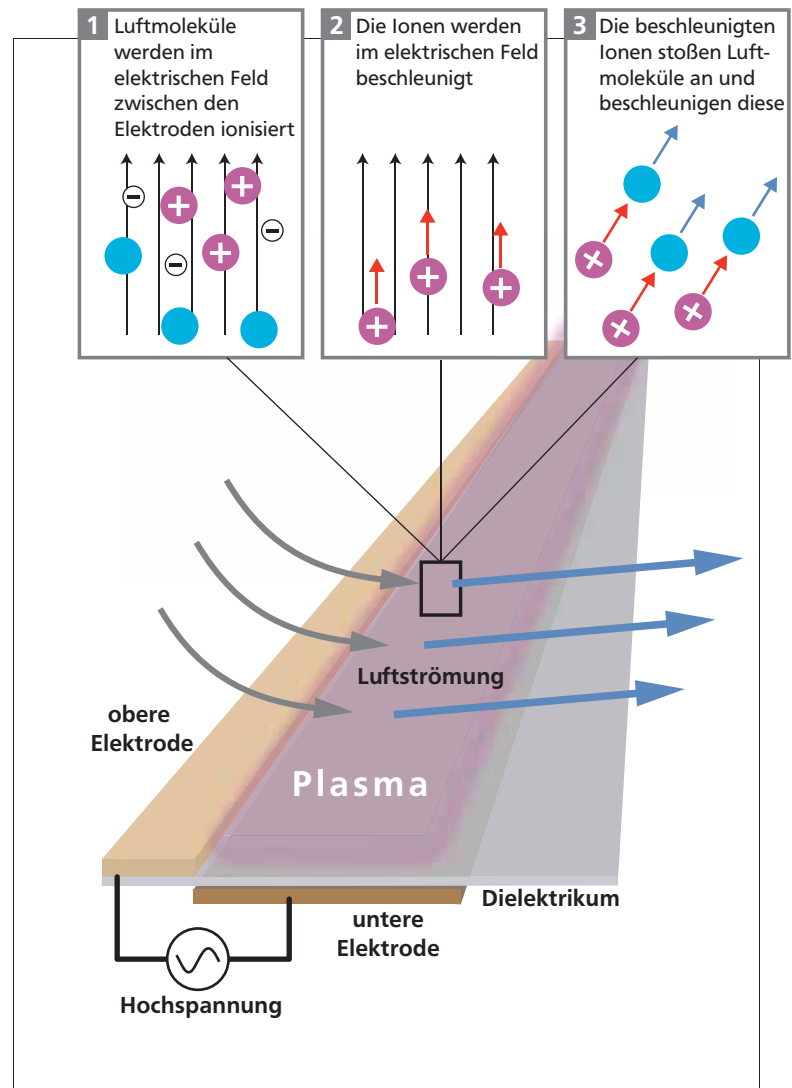


Abbildung 1
Prinzipskizze
Plasma-Aktuator.

aufwand. Jedoch findet früher oder später an jeder Körper/Fluid-Grenzfläche der als Transition bezeichnete Übergang vom laminaren zum turbulenten Zustand statt. Gelingt es aber, die Grenzschicht länger laminar zu halten, so kann dadurch der Reibungswiderstand reduziert werden. Für viele technische Anwendungen ist dies interessant, da so z. B. eine Einsparung von Kraftstoff erreicht werden kann.

Die Transition kann über verschiedene Mechanismen ablaufen. Bei der sogenannten natürlichen Transition verfällt die Grenzschicht zunächst in eine Oszillationsbewegung. Diese kann durch die

Oberflächeneigenschaften des Körpers selbst oder durch Störungen in der freien Anströmung initiiert werden. Unter ungünstigen Bedingungen wird diese Schwingung verstärkt. Werden die Amplituden zu groß, wird die Bewegung zunehmend ungeordnet und die Transition zur Turbulenz findet statt. Um diesen Mechanismus zu stoppen müssen die wandnahen Oszillationen unterdrückt werden. Eine Methode hierzu ist die aktive Wellendämpfung, bei der mit Hilfe von gepulst arbeitenden Aktuatoren die Störungen in der Grenzschicht gezielt ausgelöscht werden. Die Eigenschaften der Schwingungen müssen in sehr kurzer Zeit sensorisch erfasst und in elektronischen bzw. computerbasierten Regelkreisen verarbeitet werden, um schließlich mit dem Aktuator präzise gegenwirken zu können. Ist die Dämpfung erfolgreich kann die Grenzschicht über einen größeren Bereich des Körpers laminar gehalten werden. Im Bereich Drag and Circulation Control des CSI werden hierzu Plasma-Aktuatoren eingesetzt. Ihre speziellen Eigenschaften, wie ihre Fähigkeit einen Impuls in die Grenzschicht ohne bewegte mechanische Teile einzubringen oder der geringe Einbauraum, machen sie zu einem idealen Werkzeug für diese Aufgabe.

Eine andere Methode, den Aktuator zur Transitionsverzögerung zu verwenden, besteht darin, einen kontinuierlichen Impulseintrag in die unteren, langsamen Bereiche der Grenzschicht zu leisten. Dadurch wird die Geschwindigkeitsverteilung der Grenzschicht verändert und sie kann dadurch stabilisiert werden, so dass die wellenartigen Störungen nicht mehr angefacht und sogar gedämpft werden. Auch hierdurch kann eine längere, laminare Lauflänge der Grenzschicht erzielt werden.

Mit Hilfe moderner Messmethoden lassen sich diese Vorgänge mit hoher zeitlicher Auflösung visualisieren und der Einfluss des Plasma-Aktuators bestimmen. Die Untersuchungen sollen es ermöglichen, den Plasma-Aktuator für die verschiedenen Anwendungszwecke zu optimieren und ihn genau an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Bislang wurden die Untersuchungen der Einfachheit halber bei niedrigen Geschwindigkeiten durchgeführt. In aktuellen Experimenten werden die Geschwindigkeiten schrittweise erhöht um Plasma-Aktuatoren auch bei größeren Geschwindigkeiten gewinnbringend einzusetzen. Das langfristige Ziel ist es, die Aktuatoren in Flugversuchen zu erproben

Plasma-Aktuator

Plasma-Aktuatoren sind verhältnismäßig einfach aufgebaut. Mit zwei Elektroden und einer dazwischenliegenden, nichtleitenden Schicht können sie bequem an fast beliebiger Stelle angebracht werden. Wird zwischen den Elektroden eine Hochspannung angelegt, so bildet sich ein starkes elektrisches Feld aus. Durch dieses Feld werden die umgebenden Luftmoleküle ionisiert und es bildet sich ein schwach geladenes Plasma aus. Die geladenen Teilchen werden durch das elektrische Feld beschleunigt. Sie kollidieren mit den neutralen Luftmolekülen, wodurch diese wiederum beschleunigt werden. Diese Kraft wird vielseitig zur Modifikation wandnaher Strömungen verwendet.

und ihre Praxistauglichkeit unter Beweis zu stellen. Ein weiteres großes Forschungsgebiet am CSI ist es die Ablösung der Grenzschicht von z.B. Tragflächen zu verhindern.

Um Auftrieb erzeugen zu können, muss der Druck auf der Oberseite eines Tragflügels niedriger sein, als der Druck an der Unterseite. Jedoch muss der niedrige Druck zur Hinterkante des Flügels hin wieder

Abbildung 2
Unbemanntes
Versuchsflugzeug.



auf den Umgebungsdruck ansteigen. Die unteren, langsamen Bereiche der Grenzschicht haben nicht genügend Energie um gegen diesen Druckanstieg anzulaufen. Sie löst irgendwann vor dem Erreichen der Hinterkante ab und es kommt zu einer Rückströmung. Je nach Flugsituation kann so ein Strömungsabriss weit vor der Hinterkante oder direkt an der Vorderkante passieren und so die Auftriebs-erzeugung beeinträchtigen oder ganz verhindern. Aktive Kontrollmethoden schaffen es, das Einsetzen

• **Drag and Circulation Control**
Center of Smart Interfaces

Dr.-Ing. Sven Grundmann, Tel.: 06151/16-6212
E-Mail: grundmann@csi.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Alexander Duchmann, Tel.: 06151/16-6204
E-Mail: duchmann@csi.tu-darmstadt.de

Armin Kurz, M.Sc., Tel.: 06151/16-6204
E-Mail: kurz@csi.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Katrin Barckmann, Tel.: 06151/16-6204
E-Mail: barckmann@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de

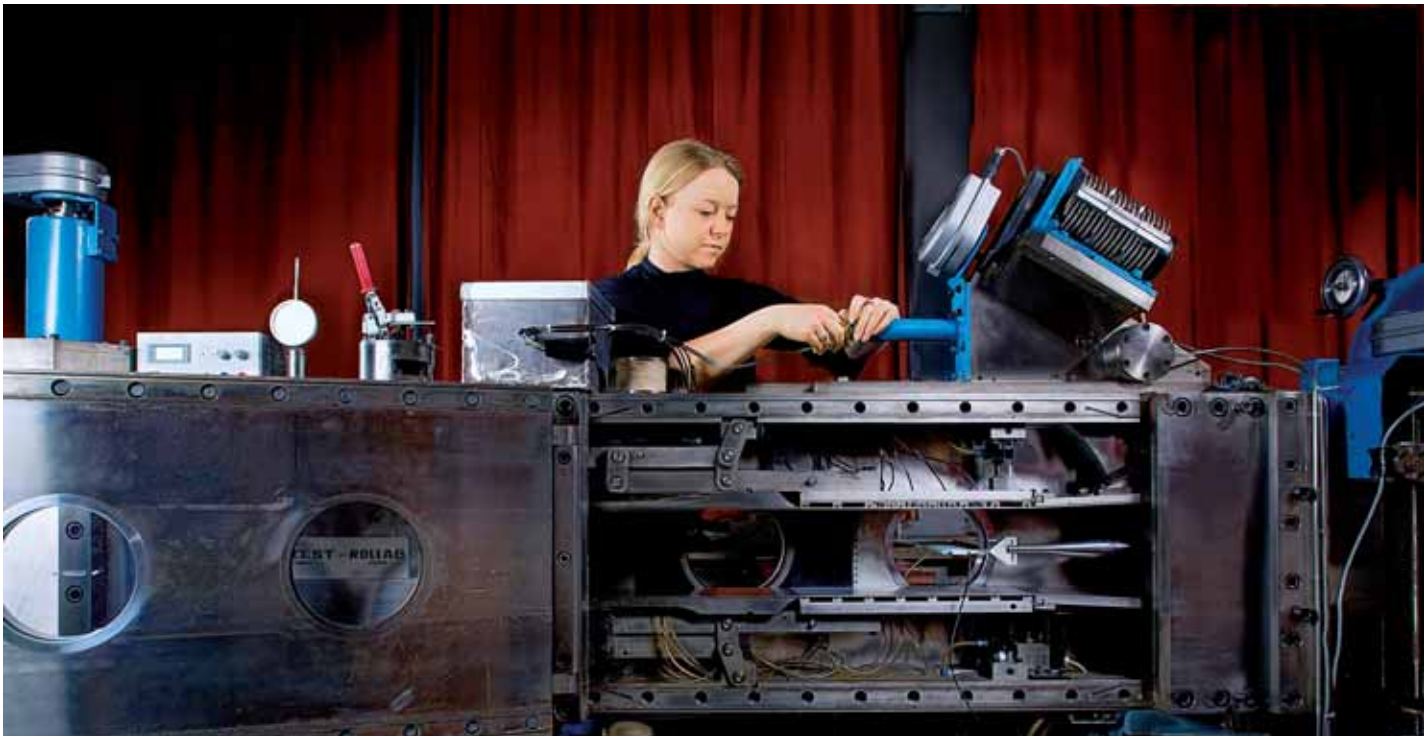
einer solchen Strömungsablösung zu verzögern, bzw. zu vermeiden, indem den langsamen Bereichen der Grenzschicht Energie zugeführt wird.

Der Strömungsabriss an den Tragflächen eines unbemannten Versuchslugzeugs konnte bei niedrigen Geschwindigkeiten, durch direktes Einkoppeln von Energie in die Grenzschicht, bereits erfolgreich zu höheren Anstellwinkeln verschoben werden. Dies bedeutet in der Praxis, dass das Flugzeug z.B. mit geringerer Geschwindigkeit starten und landen könnte, damit Start- und Landestrecken und die Lärmbelastung reduziert werden können. Das ferngesteuerte Versuchsflugzeug dient als Plattform für Experimente unter Freiflugbedingungen, die im Windkanal nicht reproduzierbar sind. Zudem steht am Institut ein mit modernster Messtechnik ausgestatteter zweisitziger Motorsegler vom Typ G109 zur Verfügung, mit dem auch bei höheren Fluggeschwindigkeiten Versuche geplant sind.

Die Anwendbarkeit von Plasma-Aktuatoren zur Strömungskontrolle ist momentan auf niedrige Strömungsgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen begrenzt. Um diese Grenze zu verschieben und um



Abbildung 3
Flügel-Profil mit
Plasma-Aktuator
Array.



festzustellen bei welchen Geschwindigkeiten noch eine brauchbare Strömungskontrolle erzielt werden kann, werden Experimente im trisonischen Windkanal der TU Darmstadt durchgeführt. Dieser Windkanal kann einen Geschwindigkeitsbereich von 0,4- bis 4-facher Schallgeschwindigkeit und somit Bereiche des hohen Unter-, Trans- und Überschalls abdecken. Die von Plasma-Aktuatoren er-

zeugte Kraft ist vergleichsweise gering gegenüber diesen hohen Geschwindigkeiten. Um dennoch ausreichend Einfluss auf die Strömung nehmen zu können müssen Konzepte zur Strömungskontrolle entwickelt werden, die nicht auf große induzierte Kräfte angewiesen sind, sondern durch kleine Krafteinkopplungen das natürliche Verhalten der Strömung ausnutzen.

Auch bei höheren Geschwindigkeiten ist die Ursache der Grenzschichtablösung ein Druckanstieg. Dieser kann jedoch unterschiedliche Ursachen haben: Den Druckanstieg zur Hinterkante des Profils aber auch ein weiterer Effekt. Ist die Anströmgeschwindigkeit nahe der Schallgeschwindigkeit, treten auf Tragflügeln lokale Überschallgebiete auf, die durch einen starken, stoßartigen Druckanstieg wieder in den Unterschall übergehen. Diese Druckanstiege können eine Grenzschichtablösung bewirken. Im Vergleich zu den Versuchen mit dem unbemannten Versuchsflugzeugs ist durch ein direktes Zuführen von Energie in die Grenzschicht keine Strömungskontrolle zu erzielen. Hier muss das natürliche Verhalten der Strömung genutzt werden und Wirbel erzeugt oder Oszillationen angeregt werden, die ihrerseits energiereiches Fluid aus der freien Strömung in die wandnahen Bereiche transportieren, um die Grenzschichten zu beeinflussen.

Plasma-Aktuatoren haben das Potential, das Gebiet der Strömungskontrolle zu revolutionieren. Ob dies für mannigfaltige Anwendungen realisierbar ist, werden neben vielen Arbeiten in aller Welt auch die Projekte an der TU Darmstadt in der Zukunft zeigen.

Abbildung 4
Katrin Barckmann bei der Arbeit am trisonischen Windkanal der TU Darmstadt.



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



Alexander Duchmann erforscht die Grenzschichtstabilisierung und Transitionskontrolle mit Hilfe von DBD Plasma-Aktuatoren im Bereich Drag and Circulation Control.



Armin Kurz arbeitet an der aktiven Wellendämpfung zur Transitionsverzögerung mit Hilfe von DBD Plasma-Aktuatoren im Bereich Drag and Circulation Control.



Katrin Barckmann untersucht die Kontrollautorität von DBD Plasma-Aktuatoren bei höheren Geschwindigkeiten im Bereich Drag and Circulation Control.

Struktur und Strömung im Wechselspiel

Die Um- oder Durchströmung eines elastischen Körpers hat eine Deformation der Oberfläche zur Folge. Die veränderte Form bewirkt eine Veränderung der Strömung, welche dann wiederum zu veränderten Verformungskräften führt. Dieses Wechselspiel ist als Fluid-Struktur Interaktion (FSI) bekannt. Solche Kopplungen können an zahlreichen Beispielen in Natur und Technik beobachtet werden. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Interaktion nicht nur



beeinflusst, sondern auch positiv genutzt werden kann. Durch Experimente und numerische Simulationen sollen Antworten gefunden werden, die die Auslegung eines selbstanpassenden Flügels ermöglichen.

► *The Interaction of Structure and Fluid*

The flow through or around an elastic body causes deformations of the surface. The shape change will result in a different flow, whereby the fluid forces will alter. This interplay is called fluid-structure interaction (FSI). There are plenty of examples in nature and engineering where one can see these couplings. The question arises whether such fluid-structure interaction can not only be properly described and predicted, but possibly be used for flow control purposes. Experiments and numerical simulations are being used to provide insight into this question, specifically the possibility of designing a self-adaptive wing is being pursued.

Benjamin Lambie, Michael Schäfer, Thilo Bein und Holger Hanselka • Im Flugzeugbau, im Bauwesen oder an Windkraftanlagen – um nur einige Bereiche zu nennen – sind die aerodynamischen Druckkräfte, die auf den Oberflächen entstehen, zum einen die gewünschten Kräfte zum anderen Lasten, die in der Auslegung der Struktur berücksichtigt werden müssen. An dieser Stelle wird oft der spektakuläre Einsturz der Tacoma Narrows Bridge im Jahre 1940 als Beispiel dafür gegeben, was passiert, wenn das Wechselspiel von Wind und Struktur nicht ausreichend berücksichtigt wird. Der Flugzeugbau hatte ähnliche Erlebnisse, die in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts zur Entstehung der Aeroelastik als eigene wissenschaftliche Disziplin führte. Diese erfasste erstmals die Phänomene wie Flattern in theoretischen Modellen.

Bei der Auslegung solcher Maschinen geht es darum, konkurrierende Anforderungen im Sinne einer optimalen Lösung zu erfüllen. Eine klassische Aufgabe für Ingenieure. Im Flugzeugbau hat man die notwendigen Festigkeiten und Stabilitäten, die aus





Abbildung 1

Der Offshore-Windpark Horns Reef befindet sich in der Nordsee 14 km westlich der dänischen Küste und wurde im Sommer 2002 in Betrieb genommen. Die 80 Anlagen mit einem Rotordurchmesser von 80 m liefern zusammen eine Maximalleistung von 160 MW. Für die Auslegung solcher Anlagen ist die Berücksichtigung der Fluid-Struktur Interaktion ein wichtiger Aspekt zur Gewährleistung der angestrebten Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit.

Abbildung 2

Der Niedergeschwindigkeitswindkanal Göttinger Bauweise am Standort Griesheim. Die geschlossene Messstrecke hat eine Länge von 4,9 m und einen Querschnitt von 2,2 x 2,9 m. Das Gebläse mit einem Durchmesser von 3,8 m wird von einem 300kW Gleichstrommotor angetrieben und ermöglicht Windgeschwindigkeiten bis zu 68 m/s. Zu sehen ist der adaptive Schlagflügel des Fraunhofer LBF.



der Forderung höherer Fluggeschwindigkeiten resultierten, mit steiferen Strukturen erreicht, welche mit einer Zunahme des Gesamtgewichts einhergehen. Die steiferen Strukturen führen dazu, dass die Flügelstruktur sich nicht mehr selbst verwinden lässt, wie es einst noch die Gebrüder Wright zur Steuerung des Flugzeuges nutzten, sondern zusätzlich Steuerklappen und Auftriebshilfen integriert werden müssen.

Mit dem ständigen Ziel, effizientere und strömungsoptimale Flügel zu bauen, sind in den letzten dreißig Jahren im Wesentlichen zwei Schwerpunkte auszumachen, die im Zeichen neuer Flügeltechnologien stehen: adaptive Flügelkonzepte und das „Aeroelastic Tailoring“. Der adaptive Flügel ist dabei durch jene Vorbilder inspiriert worden, die schon zu den Anfängen der Luftfahrt Ideengeber waren: die Vögel. Unterstützt durch die sich schnell entwickelnde Adaptronik sollen formvariable Flügel gebaut werden, die sich optimal dem jeweiligen Flugzustand anpassen. Das „Aeroelastic Tailoring“ wurde durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen technisch möglich. Diese erlauben es, kinematische Kopplungen zu integrieren, die eine definierte Verformung der Struktur nach Angriff der Luftlasten bewirken.

Der wesentliche Unterschied dieser Schwerpunkte ist die Trennung in aktive und passive Methoden der Strömungskontrolle. Der Vorteil eines passiven Ansatzes liegt im Energieverbrauch, der eines aktiven in der Erweiterung des zu kontrollierenden Parameterraumes. Ein viel versprechender Ansatz ist daher eine Integration beider Methoden: Der intelligente Flügel soll sich den wechselnden Umgebungs-

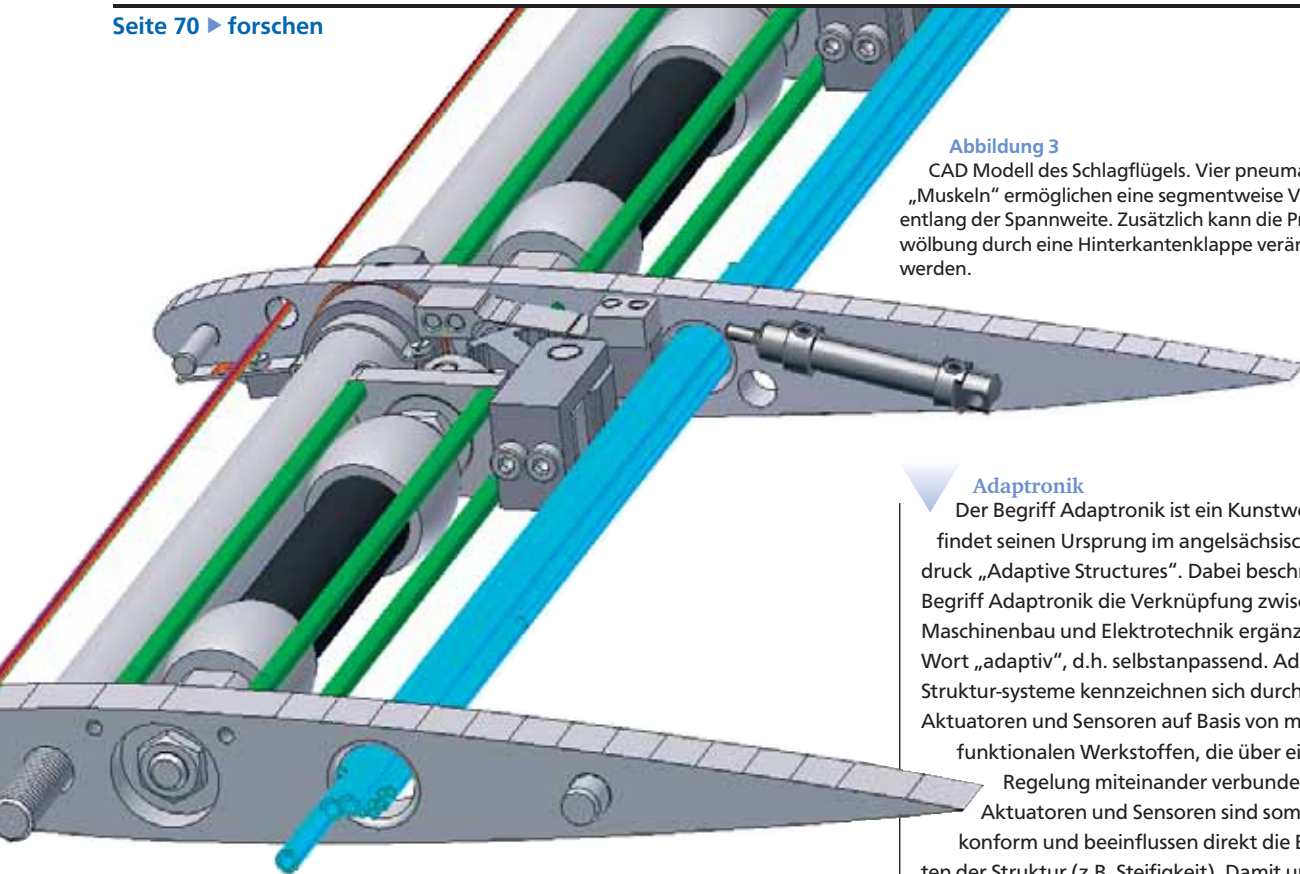


Abbildung 3

CAD Modell des Schlagflügels. Vier pneumatische „Muskeln“ ermöglichen eine segmentweise Verwindung entlang der Spannweite. Zusätzlich kann die Profilwölbung durch eine Hinterkantenklappe verändert werden.

Adaptronik

Der Begriff Adaptronik ist ein Kunstwort und findet seinen Ursprung im angelsächsischen Ausdruck „Adaptive Structures“. Dabei beschreibt der Begriff Adaptronik die Verknüpfung zwischen Maschinenbau und Elektrotechnik ergänzt um das Wort „adaptiv“, d.h. selbstanpassend. Adaptive Struktur-systeme kennzeichnen sich durch integrierte Aktuatoren und Sensoren auf Basis von multifunktionalen Werkstoffen, die über eine Regelung miteinander verbunden sind. Aktuatoren und Sensoren sind somit strukturförmig und beeinflussen direkt die Eigenschaften der Struktur (z.B. Steifigkeit). Damit unterscheidet sich die Adaptronik im Wesentlichen von der Mechatronik durch ihren hohen Grad an Strukturintegration.

bedingungen sowohl durch die Luftkräfte (passiv über variable Steifigkeiten) als auch durch eine integrierte Aktorik (aktiv) anpassen.

Die Fragestellung lautet demnach: Wie sieht diese Steifigkeitsverteilung aus und welche Anforderungen ergeben sich an das aktive System? Da bei der Beantwortung dieser Fragen Erfahrung und Wissen unterschiedlicher Disziplinen benötigt wird, bietet das Center of Smart Interfaces eine hervorragende Umgebung für die Zusammenarbeit mehrerer Fachgebiete an der TU Darmstadt. Aufbauend auf den Vorarbeiten der beteiligten Institute werden unterschiedliche Konzepte z.B. zur Wölbungsänderung durch Machbarkeitsstudien überprüft. Dabei ist stets der spätere Vergleich von Experiment und Simulation im Fokus.

• Center of Smart Interfaces

Dipl.-Ing. Benjamin Lambie, Tel.: 06151/16-6205
E-Mail: lambie@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de

• Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau

Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer, Tel.: 06151/16-2877
E-Mail: schaefer@fmb.tu-darmstadt.de
www.fmb.tu-darmstadt.de

• Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, LOEWE-Zentrum AdRIA

Dr.-Ing. Thilo Bein, Tel.: 06151/705-463
E-Mail: thilo.bein@lbf.fraunhofer.de
www.lbf.fraunhofer.de, www.loewe-adria.de

• Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenbau SzM

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Tel.: 06151/16-6924
E-Mail: hanselka@szm.tu-darmstadt.de
www.szm.tu-darmstadt.de

Experiment im Windkanal

Das Experiment wird im Windkanal der TU Darmstadt am Standort Griesheim durchgeführt. Das Fachgebiet für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) betreibt dort einen Niedergeschwindigkeitswindkanal (Abb. 2). Die geschlossene Messstrecke verfügt über eine Waage zur Ermittlung der Kraft- und Momentenbeiwerte als auch einen Zugang zur optischen Vermessung der Strömung. Die experimentelle Untersuchung wird Datensätze zur Validierung der Berechnungen liefern und gleichzeitig die Umsetzbarkeit der Lösungskonzepte garantieren. Die Herausforderung wird die Erzeugung einer Böe sein, die zum einen reproduzierbar sein muss und zum anderen durch geeignete Messtechnik quantifiziert werden soll. Darüber hinaus sind sich schnell ändernde Strömungsverhältnisse am Flügel nur durch spezielle Drucksensoren zu detektieren.

Numerische Simulationen

Für die numerischen Simulationen wird das Fachgebiet Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau (FNB) verschiedene Modelle entwickeln, die sowohl das Fluid, die Struktur als auch deren Interaktion realitätsnah abbilden. Derartig gekoppelte Berechnungen sind vergleichsweise kompliziert und stellen hohe Ansprüche an die verwendeten numerischen Verfahren. Kommerzielle Standardprogrammpakete bieten hierzu bislang

nur eingeschränkte Möglichkeiten. Am FNB wurden in den vergangenen Jahren leistungsfähige Methoden entwickelt und untersucht, die eine effiziente Berechnung der Phänomene ermöglichen. Den Ansatz bilden so genannte partitionierte Verfahren, die „etablierte“ Berechnungsverfahren für die Strömung (meist Finite-Volumen-Verfahren) und die Deformation der Struktur (meist Finite-Elemente-Verfahren) mittels eines Interfaces koppeln. Entscheidend für die Funktionalität und Effizienz ist der Kopplungsmechanismus, der die physikalische Fluid-Struktur Kopplung numerisch stabil erfassen muss.

Eine weitere Problematik ist die Turbulenz der Strömung, die eine adäquate Modellierung erfordert. Insbesondere für die Interaktion mit Strukturen stellt sich dies als große Herausforderung dar. Hier kommen neue Ansätze auf Basis der Grobstruktursimulation zum Einsatz, die eine zeitaufgelöste Beschreibung der wesentlichen Effekte erlauben. Der numerische Aufwand ist erheblich, so dass der Einsatz von parallelen Hochleistungsrechnern unabdingbar ist. Als weiterer Schritt werden mathematische Optimierungsmethoden mit den Berechnungsverfahren verknüpft, so dass sich Konfigurationen mit optimaler Funktionalität – als Input für die adaptive Steuerung – weitgehend automatisch aus den Simulationen ergeben.

Aktive Flügelstruktur

Zur Umsetzung des aktiven Systems stehen das Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) und das Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik (SZM) zur Verfügung. Gemäß dem Stand der Technik und nach Kenntnissen aus den eigenen Vorarbeiten sind für eine aktive Fluid-Struktur Interaktion grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der integrierbaren, miniaturisierten Aktorik und vor allem der hochverformbaren Werkstoffe, die während des Verformens ihre strukturelle Funktion, i. a. ihre Steifigkeit, beibehalten, notwendig. Es ist davon auszugehen, dass sich die von dem Fluid umströmte Oberfläche stark verändern muss und Dehnungen größer 10 % realisiert werden müssen, die diese Werkstoffe nicht ertragen.

Für die hochverformbare Haut kommen somit herkömmliche Werkstoffe wie metallische Bleche oder Faserverbundwerkstoffe nicht in Frage. Auch die aktuelle Materialforschung stellt zurzeit keinen

Werkstoff zur Verfügung, der eine hohe Dehnung erträgt und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit aufweist. Vielmehr liegt es nahe, einen hybriden Materialverbund aus Wandlerwerkstoffen (z.B. Formgedächtnislegierungen oder -polymeren), klassischen Leichtbauwerkstoffen und aktiven Elementen als Aktorik aufzubauen. Zur Entwicklung eines hybriden Materialverbundes sollen unter anderem Konzepte untersucht und bewertet werden, die sich in der Biologie finden lassen. Sowohl in der Pflanzen- als auch Tierwelt lassen sich ausreichend Beispiele finden, wie tragende Strukturen hohe Verformungen, Oberflächen- und Volumenänderungen durchführen. Diese Konzepte gilt es zu untersuchen und in Hinblick auf ihre Umsetzung in eine technischen Struktur zu bewerten.

Die Anwendungsmöglichkeiten solcher Flügel werden nicht auf Flugzeuge begrenzt sondern auch für Windturbinen und zukünftige Flugobjekte wie Micro-Air-Vehicles relevant sein. Die damit angestrebte Steigerung der Effizienz wird somit einen Beitrag zur Schonung der Natur und Einsparung von Energie leisten.



Benjamin Lambie ist seit 2008 als Doktorand im Forschungsbereich Drag und Circulation Control am Center of Smart Interfaces beschäftigt.



Michael Schäfer ist seit 1996 Leiter des Fachgebiets Numerische Berechnungsverfahren im Maschinenbau, Dekan der Graduiertenschule „Computational Engineering“ und Principal Investigator am CSI.



Thilo Bein arbeitet am Fraunhofer Institut LBF und ist im CSI mit Aktormaterialien und -prinzipien am Forschungsbereich Drag und Circulation Control beteiligt.



Holger Hanselka ist seit 2001 Direktor des Fraunhofer Institut LBF, Leiter des Fachgebietes Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik der Technischen Universität Darmstadt und Principal Investigator am CSI.

Inserentenverzeichnis

| | | | |
|--|----------|--|----------|
| ABUS Kransysteme GmbH www.abus-kransysteme.de | Seite 33 | MAINOVA AG www.mainova.de | Seite 31 |
| AREVA NP GmbH www.aveva-np.com | Seite U2 | MERCK KGaA www.merck.de | Seite U4 |
| Bosch www.bosch-thermotechnik.de | Seite 41 | Procter & Gamble www.pgcareers.com/ger-technical | Seite 11 |
| Brüel & Kjaer GmbH www.bkvibro.de | Seite 23 | Schenck Process GmbH www.schenckprocess.com | Seite 46 |
| Diehl Aerospace GmbH www.diehl-aerospace.de | Seite 61 | SCHENCK RoTec GmbH www.schenck-rotec.de | Seite 37 |
| EnBW Energie Baden-Württemberg AG www.enbw.com | Seite 63 | SLV Mannheim GmbH www.slv-mannheim.de | Seite 33 |
| European Space Agency (ESA) www.esa.int | Seite 38 | Software AG www.softwareag.com | Seite 39 |
| HEAG Süd Hessische Energie (HSE) www.hse.ag | Seite 10 | stellenwerk www.stellenwerk-darmstadt.de | Seite 53 |
| KSB Aktiengesellschaft www.ksb.com | Seite 21 | vmm wirtschaftsverlag gmbh & co. kg www.vmm-wirtschaftsverlag.de | Seite U3 |
| Krebs und Kiefer beratende Ing. f. d. Bauwesen GmbH www.kuk.de | Seite 51 | Wayss & Freytag Ingenieurbau AG www.wf-ingbau.de | Seite 45 |
| KNF Neuberger GmbH www.knf.de | Seite 57 | | |

Bildnachweise

Titel: Katrin Binner, S. 7: OFRA/Krukemeyer, S. 10/11, S. 47, S. 48/49, S. 50 Abb.3, S. 66, S. 67: Katrin Binner, S. 58: Lufthansa Archiv/Jens Görlich, S. 62: Bionik-Innovations-Centrum B-I-C, S. 69: Eigentum des VESTAS Wind Systems A/S, www.vestas.com, alle anderen: Archiv TU Darmstadt

Impressum forschen 2/2009

Herausgeber: Der Präsident der TU Darmstadt,
Prof. Dr. Hans Jürgen Prömel
Fachliche Beratung: Dr. Christiane Ackermann,
Leiterin Dezernat Forschung
Redaktion: Jörg Feuck, Leiter Corporate Communications

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

attraktiv...



● ● ● für Ihre erfolgreiche Kommunikation!

Kundenzeitschriften | Geschäftsberichte | Mitarbeitermagazine | Hochschulpublikationen | Newsletter | E-Journals

vmm  **wirtschaftsverlag**

Corporate Publishing

Monika Burzler | Tel: +49 (0)821 4405-423
monika.burzler@vmm-wirtschaftsverlag.de
www.vmm-wirtschaftsverlag.de/cp



Gestalten Sie Ihre Zukunft mit Merck!

Als Praktikant (m/w) Diplomand

Absolvent arbeiten Sie eigenverantwortlich

Doktorand und werden durch interessante Aufgaben gefordert.

Ihre Ideen und Ihr Know-how bringen Sie in ein motiviertes Team ein.

Wir bieten Ihnen vielversprechende Perspektiven in einem weltweit erfolgreichen innovativen Unternehmen der chemisch-pharmazeutischen Industrie.



[come2merck.de](https://www.come2merck.de)