

# forschen



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Produktion im globalen Umbruch

**Mechatronische  
Systeme – die  
technische Symbiose**

► Seite 14

**Industrieroboter –  
mehr als Montage**

► Seite 44

**Prozesslernfabrik –  
Lernen durch Erleben**

► Seite 74

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

J 57936 T • ISSN 1868-9035

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

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

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



**ROHDE & SCHWARZ**

## Liebe Leserinnen und Leser,

von den rund 40 Millionen Beschäftigten in der Bundesrepublik sind rund 8 Millionen Menschen in der Produktion tätig und nochmals davon rund 7 Millionen Arbeitsplätze in Dienstleistungsbereichen wie Logistik etc. direkt abhängig. Eine Volkswirtschaft, die sich auf Produktion von realen Produkten konzentriert, ist besser aufgestellt als eine Volkswirtschaft, die sich nur auf den Dienstleistungsbereich zurückzieht. Dies hat die letzte Krise sehr deutlich gezeigt.

Wollen wir auch in Zukunft diese über Jahrzehnte aufgebaute Stärke in der Wertschöpfung in Deutschland behalten, müssen wir uns auf allen relevanten Feldern weiterentwickeln. Dies gilt gleichermaßen für die Industrieunternehmen, die infrastrukturellen Randbedingungen, aber ganz besonders auch für die Forschungsleistung. Die TU Darmstadt stellt sich dieser Herausforderung in ganz besonderer Weise.

Das international sichtbare Forschungsprofil der TU wird u. a. geprägt durch ein Forschungsschluster „Integrierte Produkt- und Produktionstechnologie“. Eine Vielzahl von Forschern bringt hier ihre Expertise in der Wertschöpfungskette mit ein – angefangen von der Grundlagenforschung, der Produktentwicklung, der Produktionstechnologie, der Logistik bis zur Betrachtung des daraus resultierenden Verkehrsaufkommens.

Diese komplexe Aufgabenstellung erfordert Interdisziplinarität. Hier als Universität erfolgreich gestalten zu können, setzt eine hohe Kooperationsbereitschaft und -fähigkeit der einzelnen Fachgebiete voraus. Diese Kultur der fachbereichsübergreifenden Zusammenarbeit ist an der TU Darmstadt ganz besonders ausgeprägt.

Diese Ihnen vorliegende Ausgabe möchte über solche Kooperationen in dem Umfeld des oben genannten Clusters berichten. Ich wünsche Ihnen viele nützliche Anregungen bei der Lektüre und wir freuen uns über eine Kontaktaufnahme.



**Fortschritt entsteht  
zunehmend durch  
Zusammenwirken  
einzelner Wissen-  
schaftsgebiete!**

## Dear Readers,

*from the 40 million employees in the Federal Republic of Germany (FRG) about 8 million people work in the production sector; another 7 million jobs are found in the service sector, i.e. logistics etc.*

*An economy focusing on the production of real products operates more efficiently than an economy that focuses entirely on the service sector. The financial crisis gave an evident proof of that.*

*If we want to keep our present economic strength in the FRG, which has been built up over the last decades, we need to develop further in all relevant fields. This holds equally true for industrial companies, infrastructural condition and in particular the research fields. The TU handles this*

*challenge in a very delicate way. The international research profile of the TU Darmstadt is marked by a research cluster “integrated product and production technology”.*

*Numerous researchers bring in their expertise starting with the basic research of the product development, the production technology, and the logistics – all the way to the resulting traffic volume. This complex subject matter asks for*

*multidisciplinarity which demands a very strong cooperative commitment and cooperative ability of each department – to successfully handle this challenge as a university. The culture of a multidisciplinary collaboration is strongly rooted in our university and stands for its own.*

*Exemplary numerous colleagues work closely together in collaborative research centers, doctorate programs, in state projects as well as joint research projects with the industry. These projects altogether have proven that a technological advance is often been realized on the binge of science and a cooperative agreement of any sort accelerates a huge development potential at a university.*

*The readout in hand shall cover the success of the cluster and its environment. I sincerely hope that you will discover usable inspiration and we hope to hear from you soon.*

**Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele**

Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Sprecher des Clusters „Integrierte Produkt- und Produktionstechnologie“



## Produktentstehung der Zukunft

- 8** ► Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien gewinnen im Bereich der Produktentstehung stark an Bedeutung. Im Sonderforschungsbereich 666 entstehen innovative Vorgehensweisen für die virtuelle Produktentstehung.

Von Reiner Anderl, Herbert Birkhofer, Anselm Schüle

## Mechatronische Systeme gestalten die Zukunft

- 14** ► Mechatronische Systeme ermöglichen visionäre Ansätze in unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Im interdisziplinären Zusammenspiel werden neue Maßstäbe im Hinblick auf Nutzerfunktionen, Effizienz und Sicherheit gesetzt.

Von Stephan Rinderknecht, Daniel König



## Adaptronik – Die Kunst der Anpassung

- 20** ► Adaptronische Systeme gelten als Schlüssel für eine leise und sichere Welt aus nachhaltigen Leichtbaustrukturen. Die Schrittmacher hierfür kommen mit dem Fraunhofer LBF und der Technischen Universität aus Darmstadt.

Von Thilo Bein, Holger Hanselka, Tobias Melz

## Mikrotechnik in Bewegung – Neue Produktionsverfahren für Mikroantriebe

- 26** ► Mikrotechnische Produkte gehören zum Alltag: In Mobiltelefonen erkennen Beschleunigungssensoren die Lage, im Auto überwachen Drehratensensoren die Fahrstabilität. Aber sie können viel mehr.

Von Helmut F. Schlaak, Michael Schlosser, Dirk Eicher, Matthias Staab, Anika Kohlstedt



---

## Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe mit Durchdringungsgefüge

- 32** ▶ Auf die Materialwissenschaften kommen erhöhte Anforderungen zu: Umweltverträglichkeit, Energieersparnis, Rohstoffverknappung und Kostendruck treiben die gezielte Entwicklung von hoch leistungsfähigen Werkstoffen voran.

Von Jürgen Rödel, Ludwig Weiler, Jamie Susan Winzer, Irene Mieskes

---



- 38** ▶ Profile und Schalenstrukturen aus verzweigten Blechen
- Im interdisziplinären Sonderforschungsbereich 666 arbeiten Wissenschaftler an der Entwicklung und Umsetzung innovativer Profile und mehrfach gekrümmter Flächentragwerke auf Basis integral verzweigter Halbzeuge.

Von Peter Groche, Stefan Ulbrich, Wolfram Schmitt

---

## Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung

- 44** ▶ Modellbasierte Verbesserung der Genauigkeit: Gekoppelte Simulation von präzisen Roboterdynamikmodellen und Fräskraftsimulationen erschließen neue Einsatzbereiche für Industrieroboter.

Von Eberhard Abele, Jörg Bauer, Martin Friedmann, Matthias Pischan, Christian Reinl, Oskar von Stryk

---



- 50** ▶ Komplexe Oberflächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit
- Die Benetzung von Flächen kennt jeder: Beispiele sind das Beschlagen von Fensterscheiben oder Beschichtungen. Für mikrostrukturierte Oberflächen gibt es jetzt neuartige Anwendungsperspektiven.

Von Eberhard Abele, Jakob Fischer, Steffen Hardt, Selin Manukyan, Ilia Roisman

---

## Effiziente Energiewandlung als Optimierungs- und Skalierungsaufgabe

- 56** ▶ Bei der Energiewandlung fordern wir effiziente Fluidsysteme, das sind Wasserkraft-, Windkraft-, Antriebs-, Versorgungssysteme. Der Weg dahin führt zu Optimierungs- und Skalierungsaufgaben.

Von Peter Pelz, Ulf Lorenz

---

# Zukunft mit Energie.

*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?  
[www.mainova-karriere.de](http://www.mainova-karriere.de)*



---

## Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen

- 64** ▶ Eine moderne Produktionsmaschine mittlerer Größe verbraucht im Jahr etwa so viel Strom wie zwölf Einfamilienhäuser. Dass das nicht sein muss, konnten Forscher der TU Darmstadt eindrucksvoll beweisen.

Von Eberhard Abele, Benjamin Kuhrke, Stefan Rothenbücher

---



## Kohlenstofffasern inspirieren den Werkzeugmaschinenbau

- 68** ▶ Die Kohlenstofffasern, die in der Luft- und Raumfahrt eine beeindruckende Erfolgsgeschichte schrieben, halten Einzug in den Werkzeugmaschinenbau. Neuere Entwicklungen anhand der Motorspindel, eines typischen Referenzbauteils.

Von Helmut Schürmann, Eberhard Abele, Martin Klimach

---

## Die Prozesslernfabrik – erleben, lernen, forschen

- 74** ▶ Mit der Prozesslernfabrik CiP beschreitet die TU Darmstadt in der Forschung, sowie in der Aus- und Weiterbildung neue Wege. Durch die reale Produktionsumgebung wird die Qualität von Forschung und Lehre verbessert.

Von Eberhard Abele, Felix Brungs



## Integrierte Entscheidung in Produktion, Logistik und Verkehr

- 80** ▶ Im LOEWE-Schwerpunkt Dynamo PLV – Dynamische und nahtlose Integration von Produktion, Logistik und Verkehr werden interdisziplinäre Abhängigkeiten bei Entscheidungen von Unternehmen und öffentlicher Hand untersucht.

Von Hans-Christian Pfohl, Eberhard Abele, Manfred Boltze, Felix Brungs, Christian Zuber

---

# Produktentstehung der Zukunft

Moderne Produktentstehungsprozesse sind ohne IT-Unterstützung heute nicht mehr denkbar. Technologietreiber sind hierbei zum Beispiel Globalisierung, Komplexitätszunahme durch variantenreiche und disziplinübergreifende Produkte und Ressourcenknappheit. Im Sonderforschungsbereich 666 – Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung werden anhand der neuartigen Produktkategorie integral verzweigter Blechbauteile Verfahren und Methoden zur automatisierten, rechnergestützten Produktentstehung entwickelt. Daraus leiten sich neue innovative Vorgehensweisen für die virtuelle Produktentstehung ab.

## ► Future Product Creation

*Modern product development is hard to imagine without IT-support. Motivators are globalization, increase in complexity by variant-rich and multi-disciplinary products and scarcity of resources. Within the Collaborative Research Center 666 methods and processes for automated and computer-aided product creation are researched based on the innovative product range of bifurcated sheet metal products. New and innovative methods for virtual product creation are the results of this research.*

**Reiner Anderl, Herbert Birkhofer, Anselm Schüle** • Moderne Informations- und Kommunikationstechnologie gewinnt gerade im Bereich der Produktentstehung stark an Bedeutung. Mit zunehmendem Einsatz dieser Technologien geht auch ein Wandel in den Geschäftsabläufen und der Arbeitskultur einher, der zu einer Stärkung des Leistungsprofils von Industrieunternehmen führt. Neue Produktentstehungs- und Kooperationsmethoden auf der Basis moderner Informations- und Kommunikationstechnologie erlauben es dabei, simultan neue Potentiale der Produktinnovation wie auch der Prozessinnovation zu erschließen (Abbildung 1).

Etablierte Produktentstehungsansätze wie die Entwicklungsmethodik der VDI-Richtlinie 2221 werden zumeist durch manuelle und kreative Tätigkeiten dominiert, die die Entwickler von konzeptionellen Lösungen in mehreren Phasen zu konkreten Lösungen bringen. In den einzelnen Phasen der Produktentstehung finden vielzählige Iterationen statt, wenn sich z. B. getroffene Annahmen als nicht praktikabel oder falsch erweisen. Diese Form der Produktentstehung ist zeitaufwendig und die Ergebnisse dieses Prozesses entsprechen nicht zwangsläufig den optimalen, den Kunden-

anforderungen entsprechenden Lösungen. Hier setzt der Grundgedanke der algorithmenbasierten Produktentwicklung [Birkhofer 2006] ein. Er basiert auf der Einführung rechnergestützter, automatisierter Methoden in den Entstehungsprozess. Ziel ist die Minimierung der manuellen Iterationszyklen und ein – hinsichtlich der Kundenanforderungen und Unternehmensziele – Optimum von Produkt und Produktionsprozess.

## Integriertes Produktmodell

In den frühen Produktentwicklungsphasen wird der Großteil der Produktkosten festgelegt. Verfahren, die Informationen über Produkteigenschaften, Materialien und Produktionskosten in diesen frühen Phasen verfügbar machen, ermöglichen es, Kostentreiber zu identifizieren und mit geeigneten Methoden entgegenzusteuern. Das integrierte Produktmodell stellt die Basis für einen durchgängigen, medienbruchfreien Produktentwicklungsprozess dar. Je früher 3D-CAD-Modelle verfügbar sind, desto besser können sie ihre Aufgabe als Informationsträger und als digitaler Master für nachfolgende Entwicklungs- und Produktionsplanungsschritte erfüllen. Das 3D-Modell steht dabei im Mittelpunkt der Produktentstehung. Es wird zur Visualisierung genauso verwendet, wie für Nachweisrechnungen und Simulationen. Durch die Methoden des Rapid Prototypings können aus 3D-CAD-Modellen schon in frühen Phasen der Produktentwicklung reale und funktionale Modelle des aktuellen Entwicklungsstandes erzeugt werden.

Um Produkte schnell auf den Markt zu bringen, ist es wichtig, in Prozessketten zu denken und diese zu verstehen. Ein Ansatz der modernen Produkt-

## Literatur

Groche, Peter (Hrsg.) (2010: Tagungsband zum 3. Zwischenkolloquium des Sonderforschungsbereichs 666; Bamberg)

Birkhofer, Herbert (2006: Computer aided early phases in design - from market needs to the optimal product representation. INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2006, Dubrovnik)

Chahadi, Youssef (2010: Transformation der Markt- und Kundenerwartungen in Produkthanforderungen, ein Ansatz zur Rechnerunterstützung des Anforderungsermittlungsprozesses, Düsseldorf)

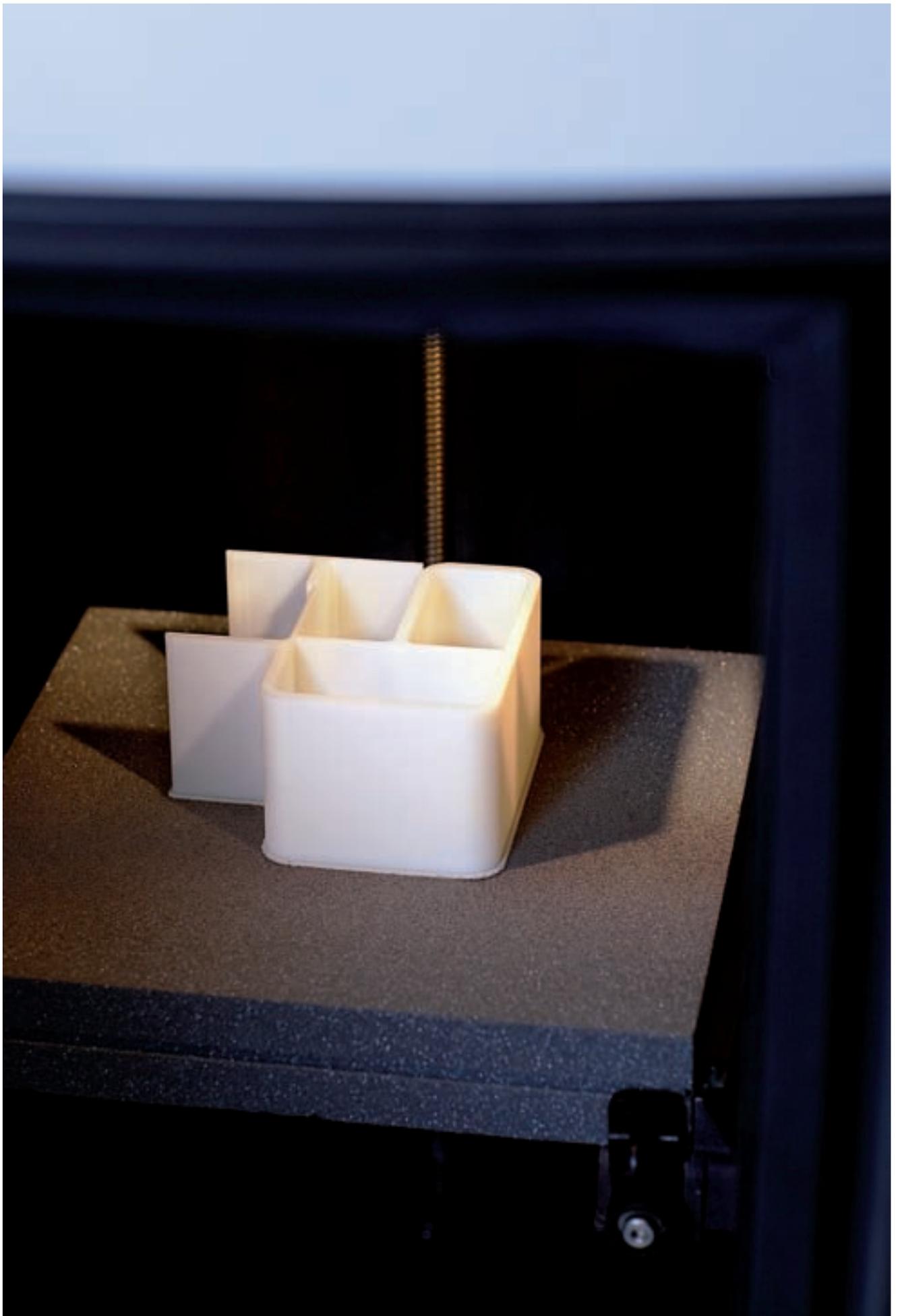


Abbildung 1

- Schnelle Informationsgewinnung aus weltweit verfügbaren Quellen.
- Verfügbarkeit von neuen, rechnerbasierten Methoden zur Produktentstehung, wie Methoden zur
  - Produktmodellierung (CAD),
  - Auslegungs- und Nachweisrechnung (FEM, MKS, CFD),
  - schnellen Validierung und Verifikation (zum Beispiel über DMUs),
  - schnellen Prototypenherstellung (Virtual and Rapid Prototyping),
  - Weiterverarbeitung von Produktdaten in Prozessketten (CAX-Prozessketten).
- Abbildung aufbau- und ablauforganisatorischer Strukturen in Produktdatenmanagementsystemen (PDM) mit der Bereitstellung der Produktentwicklungs- und Konstruktionsergebnisse per Mausklick.



Wandel der Produktentstehung durch moderne IuK-Technologien

modellierung ist der, die Produktionsprozesse, die später zum fertigen Produkt führen, bereits in der Konstruktion der Produkte zu beachten und mögliche Fertigungsrestriktionen zu berücksichtigen. Assistenzsysteme, die Informationen über Produktionsmittel und Fertigungsprozesse bereitstellen und schon während der Konstruktionsphase die Herstell- und Montierbarkeit prüfen, sind Gegenstand der Forschung. Werden Informationen über Produktionsmaschinen und Fertigungsmittel schon in der Produktentwicklung durch den Einsatz von Informationstechnologie zur Verfügung gestellt, können mit verkürzter Entwicklungszeit fertigungsgerechte Produkte erzeugt werden.

Sind die vorhandenen Produktionsmittel nicht ausreichend, so können bereits während der Produktkonstruktion geeignete Werkzeuge erstellt oder beschafft werden.

#### Featurebasierte Modellierung

In der geometrischen Modellierung wird unter einem Feature die Aggregation von Geometrielementen und semantischen Informationen verstanden. Neben einfachen Konstruktionsfeatures,

wie Quader, Zylinder oder Torus, existieren so genannte Fertigungsfeatures, die reale Fertigungsprozesse abbilden. Im Bohrungsfeature sind zum Beispiel neben den Dimensionen auch fertigungsrelevante Informationen wie Toleranzen hinterlegt. Durch automatisierte Verfahren zur Erzeugung von Produktmodellen aus definierten Produktanforderungen und -eigenschaften und mathematisch optimierten Eingangsgrößen kann in kurzer Zeit eine Vielzahl an CAD-Modellen erzeugt werden. Die featurebasierte Geometriemodellierung ermöglicht die Verarbeitung dieser Daten in Produktmodellen und das Ableiten von Produktionsprozessplänen und Maschinendaten für die

#### Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion

Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl  
Tel. 06151/16-6001  
E-Mail: [anderl@dik.tu-darmstadt.de](mailto:anderl@dik.tu-darmstadt.de)  
[www.dik.tu-darmstadt.de](http://www.dik.tu-darmstadt.de)

#### Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Herbert Birkhofer  
Tel. 06151/16-2155  
E-Mail: [birkhofer@pmd.tu-darmstadt.de](mailto:birkhofer@pmd.tu-darmstadt.de)  
[www.pmd.tu-darmstadt.de](http://www.pmd.tu-darmstadt.de)

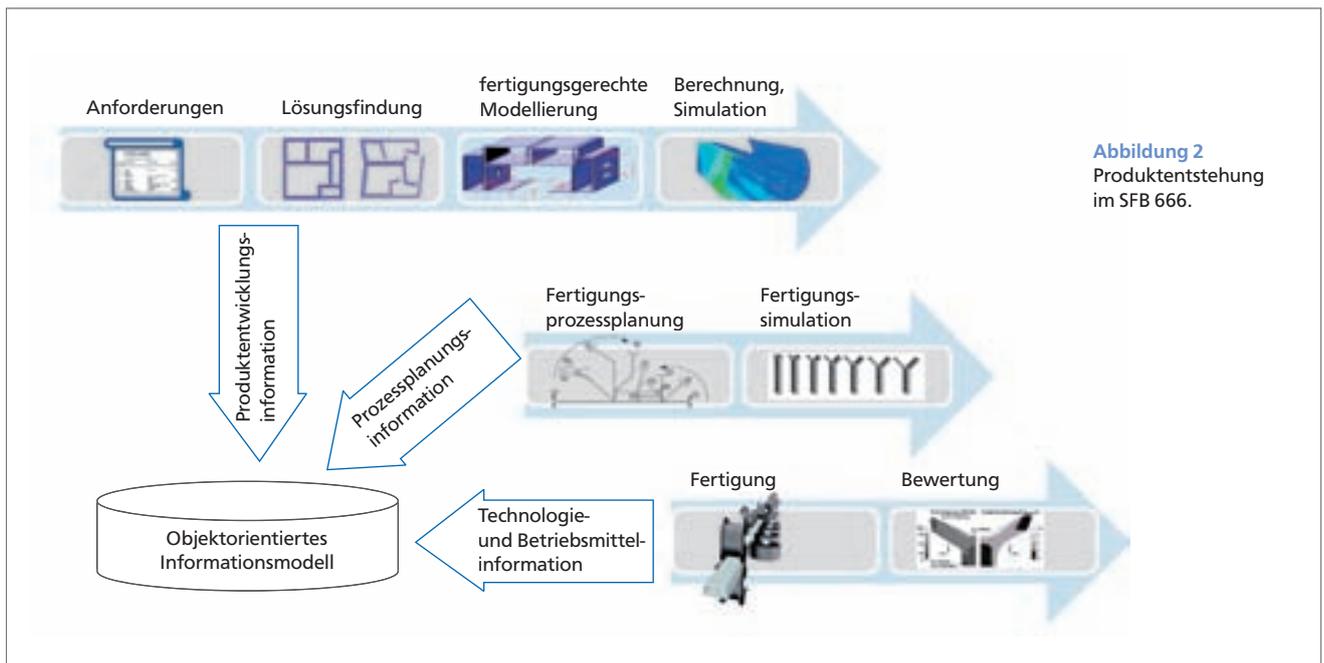


Abbildung 2  
Produktentstehung  
im SFB 666.

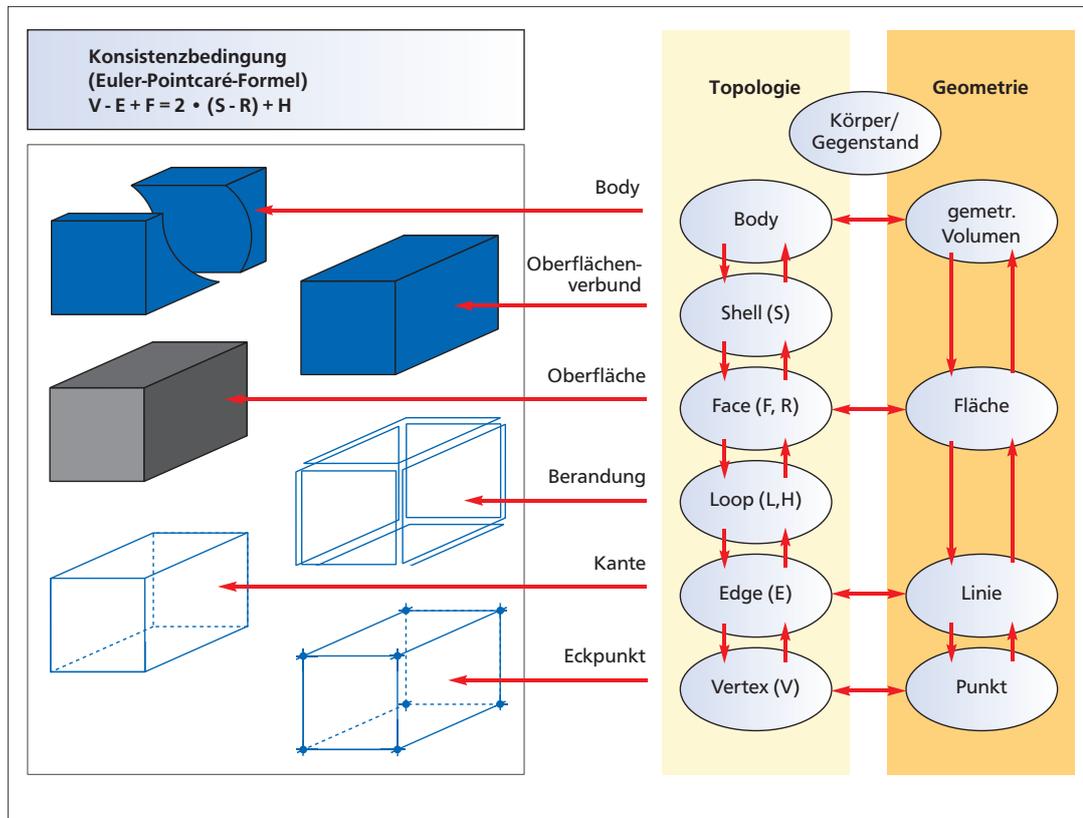
Fertigungsplanung. Eine automatisierte Modellierung erfordert aber immer auch die Implementierung von Algorithmen und das Hinterlegen von Produkt- und Prozesswissen. Die implementierten Methoden sind also immer produktgebunden und somit nicht beliebig auf andere Produktkategorien übertragbar. Bei der Modellierung werden, soweit vorhanden, bestehende Methoden und Werkzeuge von CAD-Systemen genutzt, um Produktmodelle anhand definierter Eingangsgrößen zu erzeugen. Für neue Fertigungsverfahren oder Bauweisen müssen jedoch neue Features erstellt werden, die Geometrie und Prozessinformationen beinhalten.

Im Sonderforschungsbereich 666 werden integral verzweigte Blechprodukte entwickelt, gefertigt und bewertet. In allen Phasen der Produktentstehung werden dabei rechnergestützte Methoden eingesetzt. Die Erfassung von Kundenanforderungen erfolgt über ein IT-System, das Anforderungen in Produkteigenschaften transformiert [Chahadi 2010]. Aus den Informationen der Anforderungserfassung können Parameter abgeleitet werden, die für mathematische Modelle als Randbedingungen und Eingangsgrößen zur Verfügung stehen. Das Re-

sultat der mathematischen Optimierung sind Informationen über Topologie und Geometrie der Blechprofile. Mithilfe eines definierten Austauschformats werden die ermittelten Daten an die Produktmodellierung übergeben. Im SFB 666 wurden auf Basis des 3D-Modellierkerns Parasolid Modellierungs-

#### Boundary Representation Modelle (B-Rep)

Boundary Representation Modelle stellen eine Beschreibungsform für Volumenmodelle in 3D-CAD Systemen dar. Die Modelle werden dabei durch ihre Begrenzungsflächen (engl. boundaries) beschrieben. Das Wesen der B-Rep-Modelle wird durch das Zusammenwirken von Topologie und Geometrie bestimmt (Abbildung 3). Modellierungsoperationen haben dualen Charakter und beruhen auf geometrischen Berechnungen einfacher Flächen- und Kantenprimitiva. Mithilfe von Prüfalgorithmen werden die erhaltenen Ergebnisse verifiziert und eingeschränkt. Sogenannte Euler-Operatoren manipulieren die topologische Struktur so, dass stets konsistente und topologisch korrekte Modelle erhalten bleiben.



**Abbildung 3**  
B-Rep-Struktur:  
Gegenüberstellung  
von geometrischen  
und topologischen  
Elementen.

funktionen entwickelt, um die den 3D-Modellen zugrundeliegende Datenstruktur konsistent zu manipulieren. Durch diese kernnahe Implementierung ist es möglich, die innovativen Fertigungsverfahren des Spaltprofilierens und -biegens abzubilden. Die Repräsentation dieser Fertigungsverfahren durch Fertigungsfeatures ermöglicht zum einen die Kopplung von Produktmodellierung und Produktionsprozessplanung, zum anderen die Visualisierung jeglicher Produktionszwischenschritte,

da diese durch geeignete Parametervariation dargestellt werden können. Zwischenzustände, wie sie nach einem bestimmten Produktionsschritt vorliegen, können durch Parametervariation bzw. geänderte Eingangsgrößen der automatisierten Modellierung dargestellt werden (Abbildung 2).

### Neue Herausforderungen

Die Methoden der algorithmenbasierten Produktentwicklung sind für die im Sonderforschungsbereich 666 entwickelten Blechprofile validiert und gefestigt. Eine neue Herausforderung in der zweiten Phase des SFB 666 stellt die Formalisierung der Beschreibung von Baugruppen aus Blechprofilen mit ihren Verbindungen als Grundlage für die mathematische Optimierung dar. Für die Entwicklung flächiger Blechprodukte mit Verzweigungen, wie sie ebenfalls in der zweiten Phase des SFB 666 durch Tiefziehen verzweigter Blechprofile gefertigt werden, müssen die bestehenden Methoden angepasst und erweitert werden. Insbesondere selbsttragende Schalenelemente im Bauwesen, die als mögliches Anwendungsgebiet der verzweigten Blechprodukte ausgemacht wurden, bergen durch die Verwendung gezielt geformter Freiformflächen neue Herausforderungen und großes Innovationspotential für die automatisierte Erzeugung von CAD-Modellen und den Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien.



**Reiner Anderl** ist Professor an der TU Darmstadt und Leiter des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) im Fachbereich Maschinenbau.



**Herbert Birkhofer** ist Professor an der TU Darmstadt und Leiter des Fachgebiets Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd) im Fachbereich Maschinenbau.



**Anselm Schüle** ist seit Anfang 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion im Fachbereich Maschinenbau und Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 666.

Ihre Freunde wissen nicht,  
wo Bruchsal liegt?

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



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

# Mechatronische Systeme

## gestalten die Zukunft

Mechatronische Systeme nutzen die technische Symbiose aus Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik. Im Rahmen eines interdisziplinären Entwicklungsprozesses ist sowohl die Funktionalität der Subsysteme selbst als auch deren Zusammenspiel im Gesamtsystem entscheidend (Abbildung 1). Neue Maßstäbe werden vor allem im Hinblick auf Nutzerfunktionen, Effizienz und Sicherheit gesetzt, so können z. B. mechanische Grundsysteme mit instabilem Verhalten durch elektronische Regelung stabilisiert werden. Nachfolgend werden unterschiedlichste Anwendungen vorgestellt, die am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau (IMS) erforscht werden.

### ► *Mechatronic Systems Design the Future*

*Mechatronic Systems utilize the technical symbiosis of mechanical engineering, electrical engineering and computer science. Throughout an interdisciplinary development, the functionality of subsystems as well as their interaction within the entire system is significant. New advancements take place in terms of usability, efficiency and safety since e.g. mechanical systems with an instable performance can be controlled electronically. Various applications from the research at the Institute for Mechatronic Systems in Mechanical Engineering (IMS) are introduced in the following.*

**Stephan Rinderknecht, Daniel König** • Mechatronische Systeme ermöglichen durch die übergreifende Vernetzung der verschiedenen Fachdisziplinen neue Lösungsansätze zur Bewältigung der technologischen Herausforderungen. Die Mechatronik findet zum Beispiel Anwendung in den Forschungsgebieten Fahrzeugantriebe, Flugtriebwerke, Medizintechnik oder bei Energiespeichersystemen.

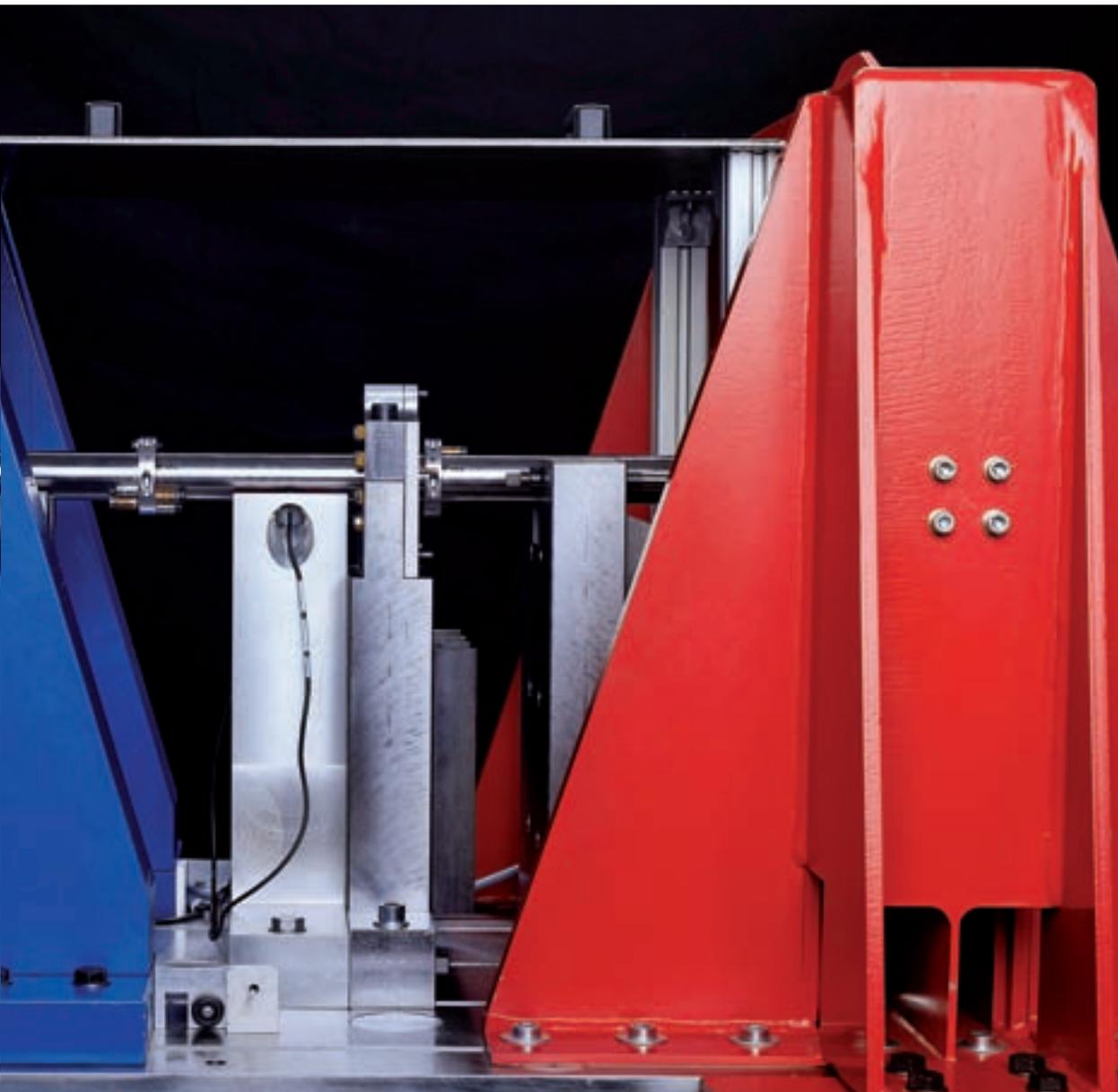
#### **Entwicklung der Fahrzeugantriebstechnologie**

Bei Fahrzeugantrieben kommt eine Vielzahl an mechatronischen Subsystemen zum Einsatz, die dann eine geschlossene, funktionierende Einheit bilden müssen. Während der Entwicklung bis zur Produktion des Fahrzeugs spielen zahlreiche Faktoren eine wichtige Rolle, unter anderem die Konzeptfindung, die Komponentenauswahl, die Subsystemintegration, die Fahrzeugintegration sowie die Optimierung.

Die Variationsmöglichkeiten der mechatronischen Antriebssysteme sind vielfältig und bedürfen bei der Auswahl zukunftssträchtiger Konzepte bereits in einer frühen Entwicklungsphase zuverlässiger



Simulations- und Bewertungsmethoden. Als konkretes Beispiel kann hier die Konzeptfindung für ein Elektrofahrzeug mit Range Extender (Zusatzaggregat zur Reichweitenerhöhung) genannt werden, bei der unter anderem die Ausführung des Range Extenders, die Anzahl der eingesetzten



Rotorprüfstand  
mit aktiver  
Lagerung.

E-Maschinen, der verwendete Getriebetyp sowie die Ganganzahl variiert werden können. Darüber hinaus besteht erhebliches Potenzial in der Weiterentwicklung der Betriebsstrategien, die vermehrt prädiktive Fahrzyklusinformationen nutzen können.

Bei der Integration und Optimierung spielt neben der Hardware-in-the-Loop-Simulation der Subsysteme auch zunehmend die Simulation des Gesamtfahrzeugs eine Rolle. Mit einem mechatronischen Car-in-the-Loop-Prüfstand soll es zukünftig möglich sein, Reaktionskräfte bzw. -momente an

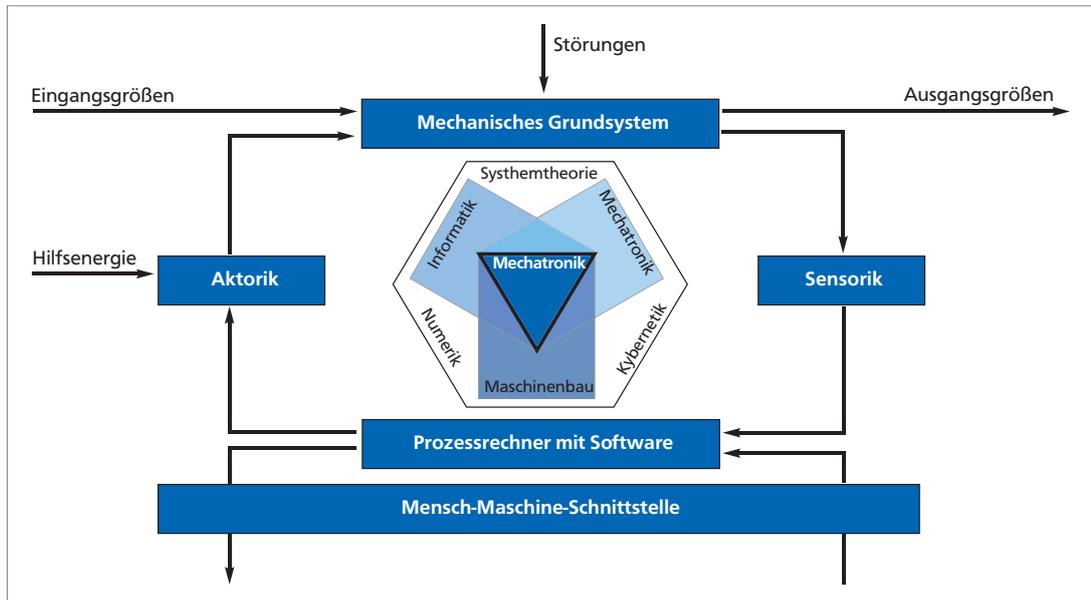


Abbildung 1  
Mechatronisches  
Gesamtsystem.

der Schnittstelle zwischen Reifen und Fahrbahn zu simulieren, die für die funktionale Entwicklung mechatronischer Antriebs-, Lenk- und Fahrwerksysteme relevant sind (Abbildung 2). Ziel ist die Anzahl erforderlicher realer Fahrversuche zu reduzieren und somit die Systementwicklung effizienter und flexibler zu gestalten.

#### Neuartige Ansätze in Flugtriebwerken

Die Mechatronik eröffnet bei der Gestaltung von Flugtriebwerken neue Lösungsansätze wie z. B. die aktive Lagerung, die Verbesserungspotenziale bei der Schwingungsminderung und der Fehlerdiagnose erschließt. Heutzutage werden bei Flugtriebwerken passive Quetschöldämpfer zur Dämpfung der Schwingungen beim Durchlaufen der Eigenfrequenzen überkritisch betriebener Rotoren verwendet. Allerdings weisen diese hydrodynamisch wirkenden Quetschöldämpfer ein stark nichtlineares Verhalten auf und benötigen eine experimentelle Auslegung aufgrund nur unzureichender Genauigkeit der verfügbaren mathematischen Modelle. Eine aktive Lagerung kann unter Verwendung von Piezostapelaktoren realisiert werden (Abbildung 3). Deren Einsatz ist in anderen Anwendungsbereichen zwar schon üblich, die Realisierung in Flugtriebwerken allerdings noch ein Zukunftsbild. Piezostapelaktoren weisen eine hohe Steifigkeit und Dynamik auf und eignen sich daher für die in Flugtriebwerken auftretenden Kräfte gut. Herausforderungen liegen vor allem im Bereich der thermischen Eigenschaften, der geometrischen Integration ins Triebwerk sowie der Regelung. Zunehmend gewinnen modellbasierte Reglerkonzepte an Bedeutung, die bislang nicht in der Industrie etabliert sind. Robustere und effizientere Regelungen sollen zur Realisierung der Zukunfts-

konzepte beitragen. Ferner ergibt sich gegenüber den passiven Systemen ein Zusatznutzen durch Erweiterung der Funktionalität sowohl im Hinblick auf die Fehlerdiagnose, die zukünftig z. B. Informationen über auftretende Unwuchten und potenziell auch deren Lokalisierung geben kann, als auch auf eine Schwingungsisolation, die zu einer Reduktion der Lagerkraftamplituden außerhalb der Resonanzbereiche führt.

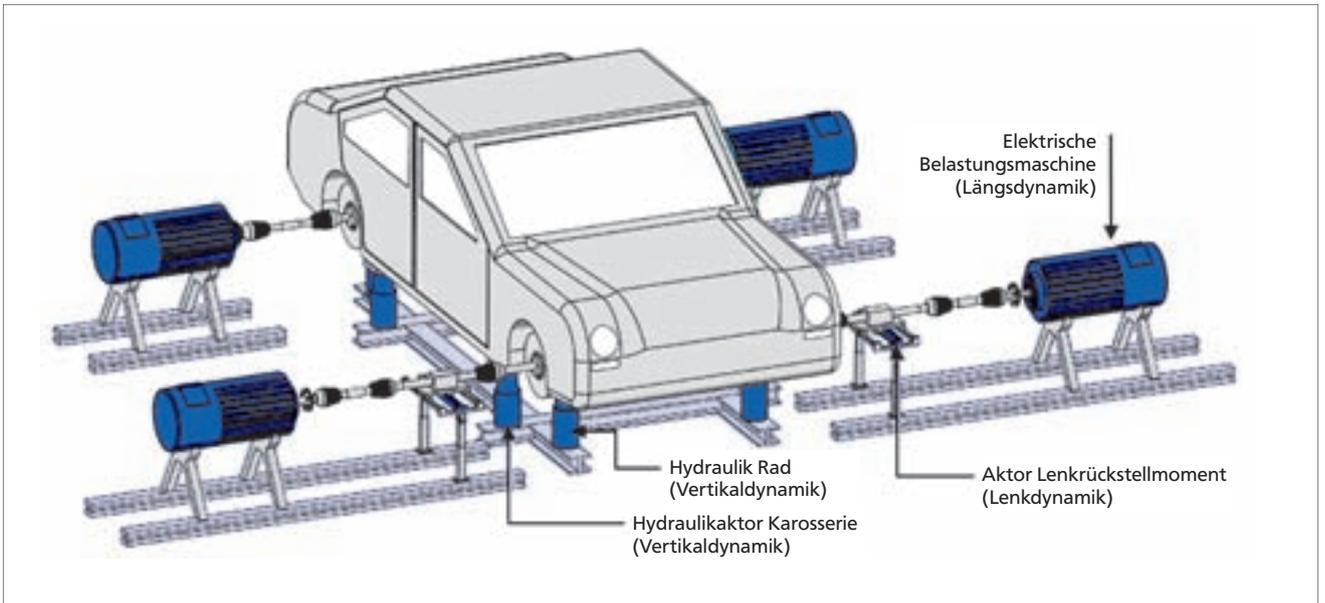
#### Mechatronische Systeme in der Medizintechnik

Auch in der Medizintechnik gestalten mechatronische Systeme die Zukunft, wie die Beispiele Rollstühle und Prothesen zeigen. Ziel dieser Anwendungen ist in besonderem Maße die Erleichterung des Alltags von Menschen mit Behinderung. Dabei stellt vor allem auch die Interaktion des Benutzers mit dem System und damit die Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Herausforderung dar. Auf Basis eines doppelt inversen Pendels wird aktuell ein Rollstuhlssystem erforscht, das zukünftig autonomes Treppensteigen ermöglichen soll. Die Problemstellung umfasst dabei vor allem die Regelung des instabilen Grundsystems, die erforderlichen Sensorinformationen sowie die hybride dynamische Modellierung zur Berücksichtigung des Aufsetzens und Abhebens der Radachsen beim Treppensteigen. Darüber hinaus gehört auch die

#### Fachgebiet Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht  
Tel. 06151/16-2074  
E-Mail: rinderknecht@ims.tu-darmstadt.de

Daniel König, M.Sc.  
Tel. 06151/16-5607  
E-Mail: koenig@ims.tu-darmstadt.de  
[www.ims.tu-darmstadt.de](http://www.ims.tu-darmstadt.de)



Gestaltung einer Bedienerschnittstelle, die möglichst geringe Anforderungen an den Nutzer stellt, zum Umfang der Forschung. Hierfür werden Ansätze der willkürlichen Muskelkontraktion (WMK) eingesetzt, die zur Detektion der Muskelbewegung ebenfalls Piezotechnik verwenden, und zukünftig hirnwellenbasierte Verfahren (EEG) erforscht. Diese Mensch-Maschinen-Schnittstellen können Menschen mit Schwerstbehinderung darüber hinaus als allgemeine Eingabegeräte z. B. für Computer oder Telefone dienen.

Für Menschen mit Oberschenkelamputation bieten mechatronische Beinprothesen mit aktiv angetriebenem Knie- und Sprunggelenk neue Möglichkeiten, das Gangbild wesentlich flexibler und natürlicher als mit den bisher am Markt verfügbaren Lösungen zu gestalten. Insgesamt soll die Muskulatur des Prothesenträgers ähnlich wie beim gesunden Bein belastet werden und die Variabilität für möglichst natürliche Bewegungsabläufe zum Beispiel bei Richtungswechseln oder beim Treppensteigen bieten. Besondere Herausforderungen lie-

**Abbildung 2**  
Car-in-the-Loop  
Prüfstand.

—ANZEIGE




## KLEINE DINGE, GROSSE WIRKUNG

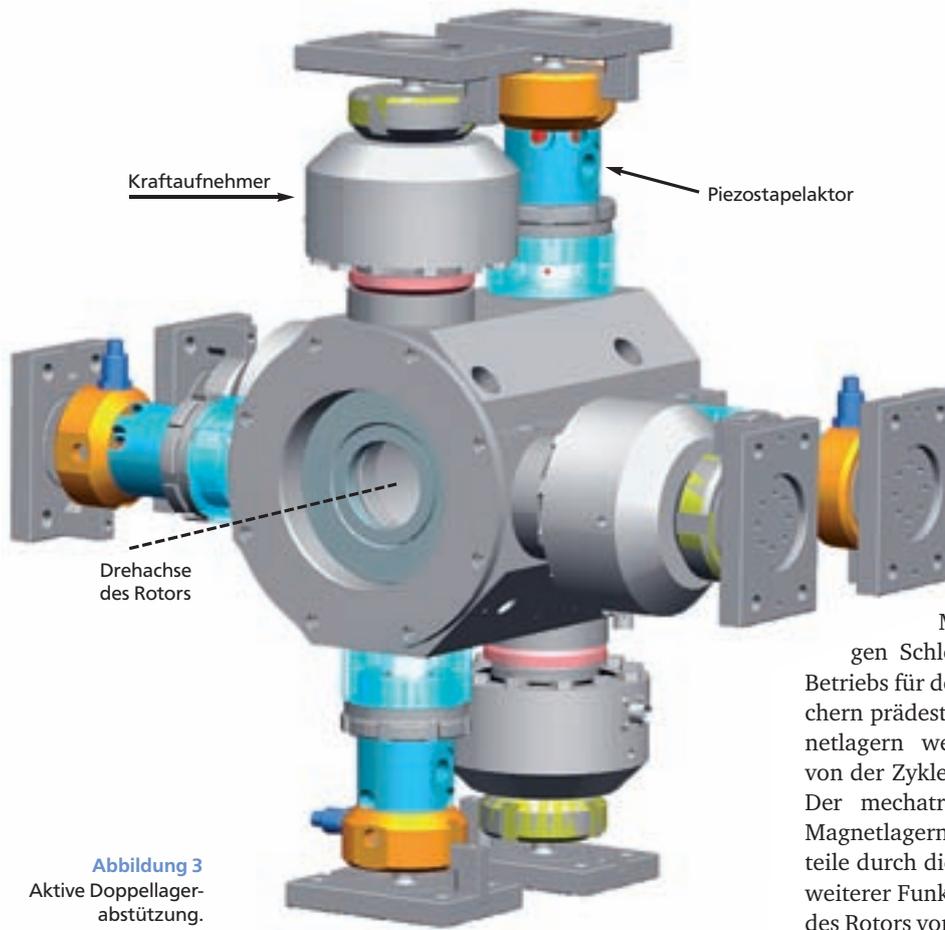
Wo sich kluge Köpfe treffen, werden oft bahnbrechende Ideen geboren. Und manchmal sind es nur relativ kleine Dinge, die den Ausschlag für eine große Idee geben: Inspirierende Architektur, die perfekte Präsentationstechnik, eine Atmosphäre einfach zum Wohlfühlen.

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





**darmstadtium**  
wissenschaft | kongresse  
[www.darmstadtium.de](http://www.darmstadtium.de)



**Abbildung 3**  
Aktive Doppellager-  
abstützung.

gen in der Kombination mechanischer und elektronischer Regelungen, im Gewicht der Antriebseinheiten sowie in der Energieversorgung bzw. Laufzeit.

#### Innovative kinetische Energiespeicher

Die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Energiespeicher zeigt sich gerade mit Blick in die Zukunft bei sehr vielen mechatronischen Systemen, wobei die Energiespeicher selbst auch wiederum mechatronische Lösungsansätze aufweisen können. Die kinetischen Energiespeicher speichern Bewegungsenergie einer Schwungmasse bzw. eines Schwungrades und zeichnen sich gegenüber chemischen Energiespeichern besonders durch hohe Leistungsdichte aus. Aktuell kommen kinetische Energiespeicher hauptsächlich in Unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) zum Beispiel in Rechenzentren und Krankenhäusern zum Einsatz. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften sind in Zukunft vermehrt auch Anwendungen im Bereich der Rekuperation der Bremsenergie von Fahrzeugen, der Lastgangglättung im Stromnetz sowie allgemein der Speicherung regenerativ erzeugter Energie zu erwarten. Abhängig vom Einsatzgebiet ergeben sich unterschiedliche Systemanforderungen an das System. Für Anwendungen mit hoher Leistungszeit, z. B. bei der Speicherung regenerativ erzeugter Energie, sind vor allem die Standby-

bzw. Leerlaufverluste ausschlaggebend. Bei Anwendungen mit großer Zyklenzahl, zum Beispiel bei der Rekuperation der Bremsenergie, spielen dagegen die Wandlungsverluste eine sehr große Rolle. Berührungslose

Magnetlager sind aufgrund der geringen Schleppverluste und des wartungsfreien Betriebs für den Einsatz in kinetischen Energiespeichern prädestiniert. Bei der Verwendung von Magnetlagern weisen Schwungmassenspeicher eine von der Zyklenzahl unabhängige Lebensdauer auf. Der mechatronische Systemansatz mit aktiven Magnetlagern bietet darüber hinaus besondere Vorteile durch die direkte Möglichkeit der Umsetzung weiterer Funktionen wie die Schwingungsisolierung des Rotors vom Stator oder die Fehlererkennung eines sich ankündigenden Bauteilversagens.

#### Chancen und Optimierungsansätze

Mit mechatronischen Systemen lässt sich zukünftig noch erhebliches Optimierungspotenzial schöpfen. Neben der Weiterentwicklung der Subsysteme ist vor allem die Systemintegration durch eine weitere Intensivierung der interdisziplinären Zusammenarbeit zu stärken. Zur Reduzierung steigender Kosten sind insbesondere auch die Produktionstechnologien wesentlich intensiver einzubeziehen. Insgesamt sind bei der Bewältigung der technologischen Herausforderungen der Zukunft, die einen maßgeblichen Beitrag zur Nachhaltigkeit und damit ein Höchstmaß an Effizienz verlangen, mechatronische Systemansätze nicht mehr wegzudenken.



**Stephan Rinderknecht** ist seit 2009 Professor im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt. Er leitet das Fachgebiet Mechatronische Systeme im Maschinenbau.



**Daniel König** ist seit November 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mechatronische Systeme im Maschinenbau im Bereich Elektromobilität.



Wo kann ich mit meiner  
Erfahrung jeden Tag noch  
etwas Neues lernen?

Shi Jian Ming will es wissen.  
Bei Siemens hat er jeden Tag neue Möglichkeiten, sich weiterzuentwickeln.

Als Shi Jian Ming 1995 zu uns wechselte, konnte der gelernte Ingenieur bereits auf ein beeindruckendes Berufsleben zurückblicken. Seitdem hat seine Karriere noch einmal an Fahrt aufgenommen: Heute arbeitet er in einem internationalen Team als Vertriebsleiter für die Energiesparte von Siemens in Shanghai. Dort bleibt Shi Jian Ming immer auf dem neuesten Stand der technischen Entwicklung – und kann gleichzeitig seine interkulturelle Kompetenz ausbauen. Das hält seinen Job so spannend wie am ersten Tag. Wollen Sie wissen, wohin Sie eine Karriere bei Siemens führen kann? **Finden Sie's heraus.**

[siemens.com/careers](https://www.siemens.com/careers)

**SIEMENS**

# Adaptronik

## – Die Kunst der Anpassung

Die Adaptronik beschreibt eine interdisziplinäre Strukturtechnologie, die die Umsetzung selbstanpassender (adaptiver) mechanischer Systeme ermöglicht. Adaptronische Struktursysteme können sich veränderlichen Betriebsbedingungen selbsttätig anpassen, um bei möglichst geringem Energieverbrauch und möglichst wenig einzusetzendem Material eine gewünschte Funktionalität zu gewährleisten. Wesentlich ist hierbei, dass die Zielstruktur nicht wie bisher im Maschinenbau üblich passiv ist, sondern mit Hilfe intelligenter Werkstoffe aktiv in ihre Eigenschaften und Funktionalität eingreift und diese ständig nachreguliert und optimiert.

### ► Adaptronics – the art of adaption

*Adaptronics is a highly interdisciplinary research field describing adaptive technical structural systems. Such systems autonomously adapt to their respective operational environment ensuring a defined functionality with minimal energy consumption and minimal costs of material. Adaptronics integrates additional functionality by combining conventional structures with intelligent material systems, which extend the classic function of load-bearing and shape-defining structures to sensing and actuating capabilities.*

**Thilo Bein, Holger Hanselka, Tobias Melz** • Im globalen Wettbewerb und den damit verbundenen Herausforderungen steigen die Anforderungen an zukünftige Produkte kontinuierlich an. Dies auch durch sich verschärfende gesetzliche und gesellschaftspolitische Rahmenbedingungen bezüglich Energie- und Ressourceneffizienz, Lärm, Emissionen, Präzision und Dynamik, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Produktflexibilität und vieles mehr. Um den daraus resultierenden, produktbezogen häufig gegensätzlichen Anforderungen gerecht zu werden, stoßen heutige technologische Ansätze zunehmend an ihre Grenzen. Zum Überwinden dieser technischen und durch den Gesetzgeber induzierten Grenzen steigt der Bedarf nach neuartigen Strukturansätzen. Dem begegnet die Adaptronik (angelsächsisch smart structures) durch strukturkonforme Integration von „Intelligenz“ (in Form von Aktoren, Sensoren, Elektronik und Software) in Bauteile und Struktursysteme. Die Adaptronik ermöglicht so die Modifikation von oder die Ausbildung neuer mechanischer Struktureigenschaften, so dass der bekannte technische Rahmen verlassen und neue Produkteigenschaften in erweiterten Grenzen realisiert werden können. Die Adaptronik





Tragwerk mit verteilten adaptiven Tilgern zur Schwingungskompensation.



Abbildung 1  
Das Fraunhofer Transferzentrum Adaptronik.

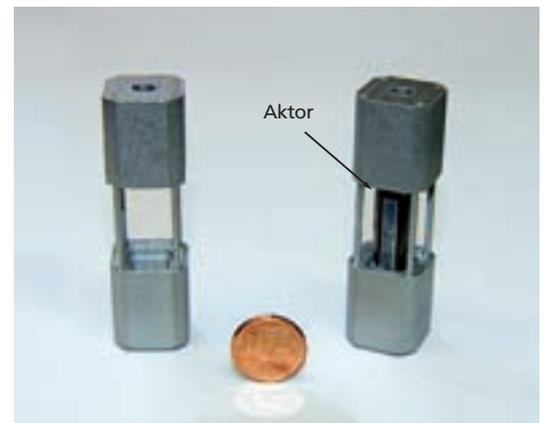
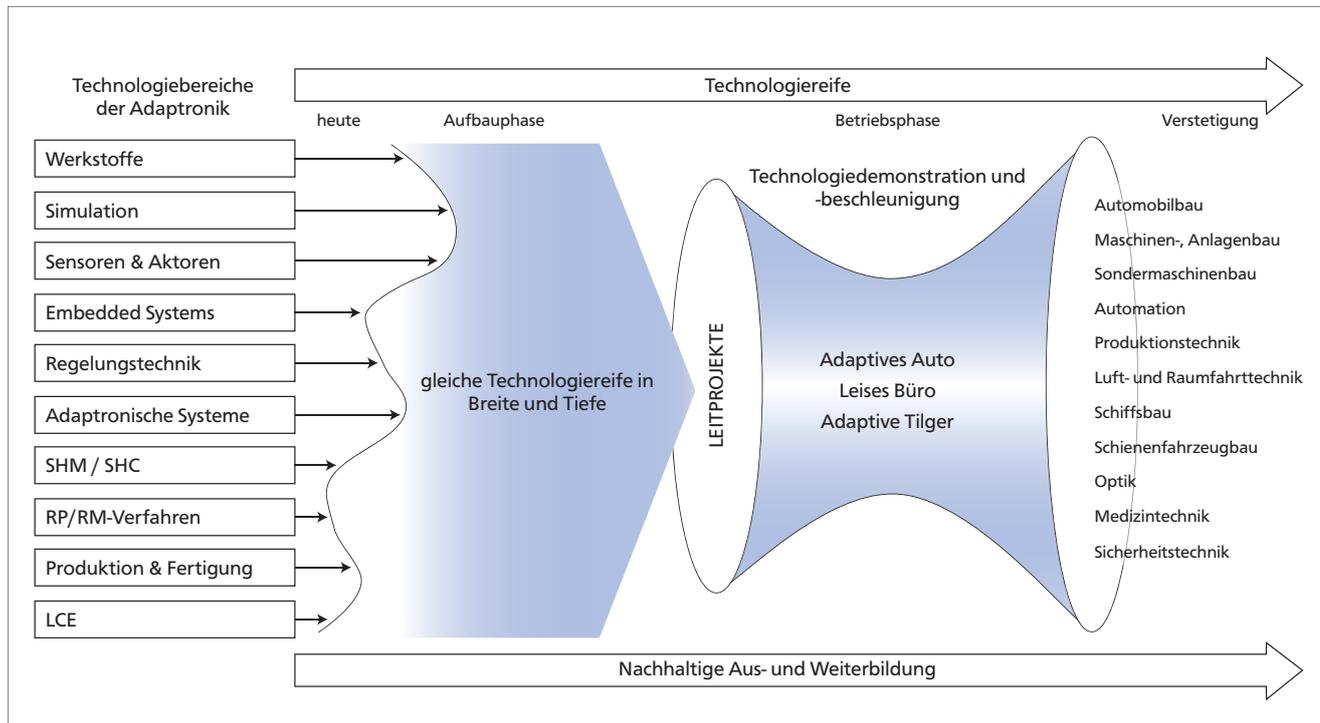


Abbildung 2  
Aktive Strebe: Integration von piezokeramischen Stapelaktoren mittels selektives Laserschmelzen.



Abbildung 3  
Aktives Interface zwischen PKW-Federbein und Karosserie.



ist damit anerkanntermaßen eine der zentralen Schlüsseltechnologien zur nachhaltigen Entwicklung von Produktinnovationen in den Marktfeldern Energie, Mobilität, Umwelt und Gesundheit. Der adaptronisch erschließbare Performancezuwachs unterstützt dabei optimal die Beherrschung künftiger globaler Herausforderungen in den Branchen Automobilbau, Energietechnik, Schiffs- und Schienenfahrzeugbau, Maschinen- und Anlagenbau, Bau- und Haustechnik, Medizintechnik und Produktionstechnik, um nur einige zu nennen. Am Standort Darmstadt hat sich über die zurückliegenden Jahre eine weltweit einmalige Forschungsinfrastruktur zum Thema Adaptronik etab-

**Abbildung 4**  
Struktur des LOEWE-Zentrums AdRIA – Technologebereiche und Leitprojekte.

liert. Hierzu gehören neben dem LOEWE-Zentrum AdRIA (Adaptronik – Research, Innovation, Application) im Wesentlichen das Fraunhofer Transferzentrum Adaptronik, der Forschungsschwerpunkt Adaptronik an der TU Darmstadt sowie der Forschungsschwerpunkt Funktionsintegrierter Leichtbau an der Hochschule Darmstadt. Die letztgenannten Forschungsschwerpunkte sind dabei direkt aus dem LOEWE-Zentrum AdRIA im Rahmen der Verstetigung des Zentrums hervorgegangen. Komplementiert wird dieses durch die Vertiefungsrichtung Adaptronik im Masterstudiengang Mechatronik, um den wissenschaftlichen Nachwuchs zu gewährleisten.



**Thilo Bein** ist administrativer Koordinator des LOEWE-Zentrums AdRIA und Geschäftsfeldleiter Öffentliche Projekte am Fraunhofer-Institut LBF.



**Holger Hanselka** ist seit 2001 Leiter des Fachgebietes SzM der Technischen Universität Darmstadt, Direktor des Fraunhofer-Institut LBF und sowie Koordinator des LOEWE-Zentrums AdRIA.



**Tobias Melz** ist Leiter des Kompetenzzentrum Mechatronik/Adaptronik am Fraunhofer-Institut LBF.

### Das LOEWE-Zentrum AdRIA

Im LOEWE-Zentrum AdRIA arbeiten fachlich komplementäre Partner aus den sechs Fachbereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik, Material- und Geowissenschaften, Informatik, Mathematik und Chemie der TU Darmstadt, dem Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik der Hochschule Darmstadt und dem Fraunhofer LBF sowohl thematisch als auch örtlich eng zusammen. Gemeinsames Ziel ist es, grundlagen- und anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungskompetenz abgestimmt weiterzuentwickeln, wissenschaftlich-technologische Aus- und Weiterbildung von Studenten und externen Partnern zu betreiben und in einem Netzwerk aus Forschung, Wirtschaft und Wirtschaftsförderung die Schlüsseltechnologie Adaptronik für nachhaltige Produktinnovationen und wissenschaftliche Exzellenz zu sichern.

Als vorrangiges Ziel werden im LOEWE-Zentrum AdRIA die erforderlichen wissenschaftlich-technologischen Themenfelder der Adaptronik konsequent in Tiefe und Breite weiterentwickelt, um eine systematische, ganzheitliche Entwicklung sowie einen hohen Marktreifegrad adaptronischer Produkte zu erreichen. Übergeordnetes technologisches Ziel ist es, mit Hilfe der Adaptronik die nachhaltige, technische Basis für einen nachhaltigen, konsequenten aktiven Strukturleichtbau zu schaffen, der sowohl eine verbesserte Energieeffizienz über den Lebenszyklus als auch erhöhte Funktionalität (zum Beispiel integrierte aktive Sicherheitssysteme oder sich selbst überwachende Strukturen) sowie eine Performancesteigerung (zum Beispiel präzise, leise und schwingungsarm) von technischen Produkten ermöglicht. Um diese Ziele zu erreichen, werden im LOEWE-Zentrum AdRIA sowohl Grundlagenforschung und Technologieentwicklung in definierten Technologiebereichen (Abbildung 1) als auch die Technologiedemonstration anhand von drei exemplarischen Leitprojekten verfolgt.

**Das Fraunhofer Transferzentrum Adaptronik**

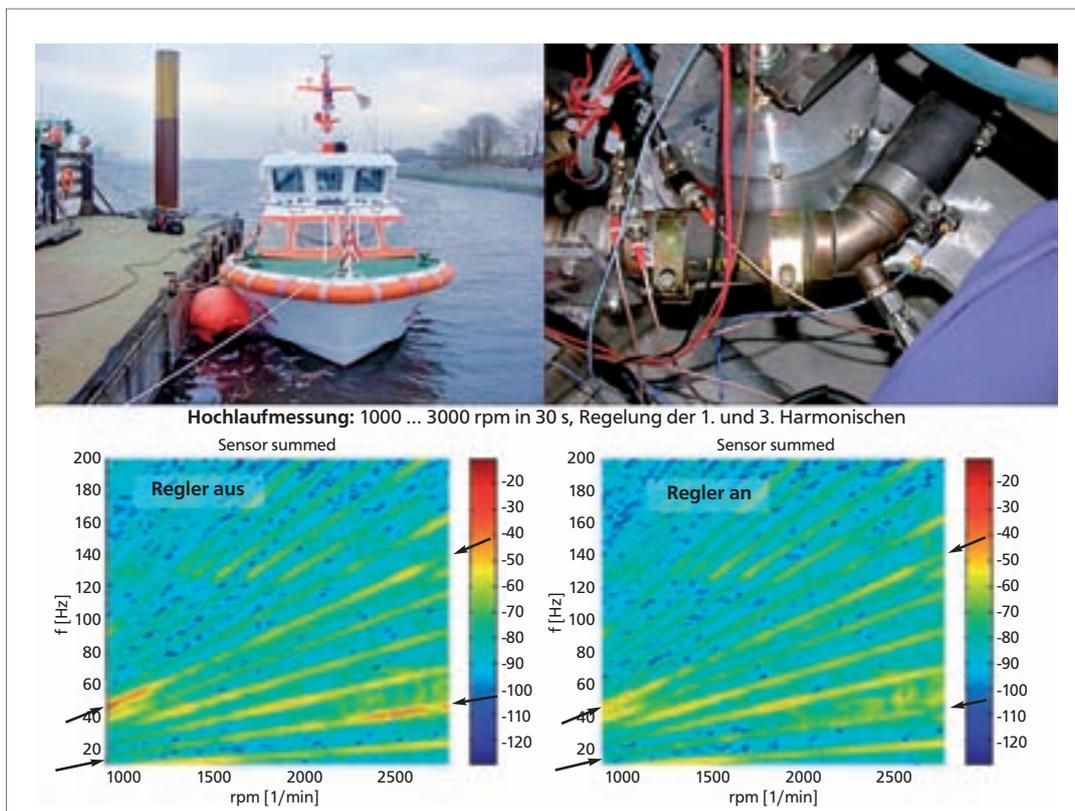
Im Fokus des Fraunhofer-Transferzentrums Adaptronik (TZA) stehen FuE-Projektarbeiten zum unmittelbaren Nutzen von Industrie und Gesellschaft (Abbildung 2). Dabei geht es besonders um den Nachweis von technischen und wirt-

schaftlichen Machbarkeiten aktiver Strukturösungen, die Umsetzung und den Test prototypischer Lösungen sowie den Transfer in die technische Produktentwicklung. Hierfür stehen Labore und Prüfhallen sowie Projekthausbüros und Seminar-kapazitäten zur Verfügung, die in gemeinsamen Entwicklungsprojekten mit Vor-Ort-Teams von Fraunhofer-Forschern und deren Partnern genutzt werden.

Diese örtlich enge Zusammenarbeit schafft eine beidseitige Win-Win-Situation, bei der einerseits Technologieanbieter und andererseits Technologienutzer ihre jeweilige interdisziplinäre Expertise problembezogen, flexibel und unmittelbar gemeinsam zusammenführen können. Dies ermöglicht

**Das LOEWE-Zentrum AdRIA**

Das LOEWE-Zentrum AdRIA – als eines von acht Zentren, welche im Rahmen des hessischen Forschungsförderungs-Programms LOEWE gefördert werden – steht für die systematische Vernetzung der Adaptronik-relevanten Kompetenzen und Ressourcen in der Region. So stellt das LOEWE-Zentrum AdRIA ein weltweit einmaliges Zentrum für Adaptronik dar, welches ein ganzheitliches Kompetenzangebot von der Forschung und Entwicklung bis hin zu Anwendungen im Kleinserienmaßstab bündelt. Auf dieser Leistungsbasis können gemeinsam mit Forschungs- und Entwicklungspartnern vor Ort Forschungsprojekte in allen Adaptronik-affinen Branchen ganzheitlich und maßgeschneidert durchgeführt werden.



**Abbildung 5**  
Aktives Motorlager:  
Aktive Schwingungs-  
kompensation an  
einem Dieselmotor  
eines Schiffes.

gegenseitiges Lernen, Schaffung von Teamverständnis über technische und wirtschaftliche Randbedingungen und Machbarkeiten, schnellere, fokussierte und bessere Systemlösungen und Know-how-Transfer. Dadurch sollen Produktinnovationen erleichtert werden.

#### Leistungsspektrum am Standort Darmstadt

Mit dieser Forschungsinfrastruktur können erstmalig maßgeschneiderte und ganzheitliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte über die gesamte Entwicklungskette aus einer Hand umgesetzt werden. Das Leistungsspektrum umfasst dabei die experimentelle und numerische Ist-Analyse und Systemidentifikation technischer Strukturen, die Entwicklung von neuen Funktionswerkstoffen, Simulationsmethoden, Regelungsstrategien und Embedded Systems für die Adaptronik bis hin zur durchgehenden Auslegung und Entwicklung adaptronischer Systeme, deren Systemintegration und Prototyping sowie der Bewertung deren Systemzuverlässigkeit. Hierzu stehen den Partnern vor Ort eine leistungsfähige

Ausstattung zur Verfügung, die u. a. ein Dual-Beam Focused Ion Beam Rasterelektronenmikroskop, selektives Lasersintern für Kunststoffe und Metalle (Abbildung 3), State-of-the-Art Messtechnik für die strukturdynamische und vibro-akustische Analyse oder ein Computertomograph für Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanalysen zur Verfügung. Das Leistungsspektrum lässt sich am Beispiel der Entwicklung einer aktiven Lagerung eines Hauptantriebsaggregates eines Schiffes anschaulich ver-

#### Adaptronik

Adaptive Struktursysteme kennzeichnen sich durch integrierte Aktoren und Sensoren auf Basis von multifunktionalen Werkstoffen, die über eine Regelung miteinander verbunden sind. Aktoren und Sensoren sind strukturkonform integriert und beeinflussen direkt die Eigenschaften der Struktur (zum Beispiel Dämpfung oder Steifigkeit). Damit unterscheidet sich die Adaptronik im Wesentlichen von der Mechatronik durch ihren hohen Grad an Strukturintegration.

ANZEIGE

**VERANSTALTUNGSHINWEIS · Adaptronic Congress 2011**  
 Topics: Anwendungen, Werkzeuge, Komponenten und Entwicklungen

07.-08. September 2011 · darmstadtium (Darmstadt)  
 Internationale Konferenz, Ausstellung und Akademie im Zielfeld „Adaptronik“

© Bild: darmstadtium

**Veranstalter**  
 Adaptronic Congress Management GbR  
 Bürgerstraße 44/42  
 37073 Göttingen  
 info@adaptronic-congress.com

**Gesellschafter**  
  
 Sperlich GmbH  
 Wegbereiter für Innovationen

**Prime Partner**  
  
 ERAS  
 Entwicklung und Realisation  
 Adaptiver Systeme

**Fraunhofer**  
 LBF

  
 ADAPTRONIC  
 CONGRESS

[www.adaptronic-congress.com](http://www.adaptronic-congress.com)

deutlichen (Abbildung 4). Die Lagerkomponenten basieren auf piezokeramischen Materialien, die ergänzend zu den passiven Lagern direkt in die mechanische Störübertragung der Motorlagerung eingebracht wurden und der Körperschallübertragung störmindernd entgegenwirken. Eine wesentliche Herausforderung ist hierbei die konstruktive Integration des piezokeramischen Materials und die Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit unter Berücksichtigung aller auf die Lager einwirkenden mechanischen Lasten. Zur Generierung des Lastenheftes wurde zunächst eine umfangreiche Ist-Analyse durchgeführt. Die ermittelten Messdaten dienten zum Aufbau eines numerischen Gesamtsystemmodells, anhand dessen unterschiedliche Lagerkonzepte simulativ vorbewertet, ein optimiertes Lagerdesign ermittelt und die Komponentenentwicklung risikoarm eingeleitet wurden. Anhand eines speziell entwickelten Versuchsstands, bestehend aus einem Teilsegment des Schiffes, dem Antriebsmotor, einem Abtriebsmotor etc., konnten die aktiven Lager labortechnisch auf ihre Funktion und Zuverlässigkeit untersucht werden.

Abschließend erfolgte die Systemintegration aller Komponenten in das Schiff. Das aktive Lager wurde in Fahrversuchen getestet, wobei die Reduktion der vom Motor in das Fundament eingeleiteten Schwingungen sowie der prinzipiellen Auswirkung auf den Luftschall nachgewiesen wurde.

#### Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit

##### LBF, LOEWE-Zentrum AdRIA

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein  
Tel. 06151/705-463  
E-Mail: [thilo.bein@lbf.fraunhofer.de](mailto:thilo.bein@lbf.fraunhofer.de)  
[www.loewe-adria.de](http://www.loewe-adria.de)

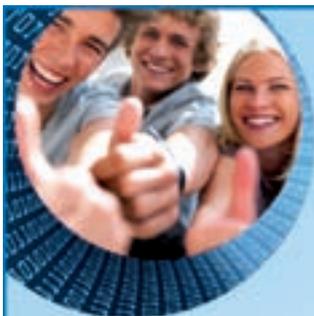
#### Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenbau SzM

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka  
Tel. 06151/16-6924  
E-Mail: [hanselka@szm.tu-darmstadt.de](mailto:hanselka@szm.tu-darmstadt.de)  
[www.szm.tu-darmstadt.de](http://www.szm.tu-darmstadt.de)

#### Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Dr.-Ing. Tobias Melz  
Tel. 06151/705-252  
E-Mail: [tobias.melz@lbf.fraunhofer.de](mailto:tobias.melz@lbf.fraunhofer.de)  
[www.lbf.fraunhofer.de](http://www.lbf.fraunhofer.de)

— ANZEIGE



Creating safety.  
With passion.

# NewTec

System-Entwicklung und Beratung

## NewTec – ein Gewinn von Anfang an.

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

### Wir suchen Sie, für unsere Standorte

Mannheim, Pfaffenhofen, Freiburg und Friedrichshafen

Sie sind Absolvent der Fachrichtungen:

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

Dann bewerben Sie sich initiativ bei uns.

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

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

**NewTec GmbH**  
System-Entwicklung und Beratung  
Buchenweg 3  
89284 Pfaffenhofen a. d. Roth  
Tel. 07302 9611-42  
[svenja.notz@newtec.de](mailto:svenja.notz@newtec.de)

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

# Mikrotechnik in Bewegung – Neue Produktionsverfahren für Mikroantriebe

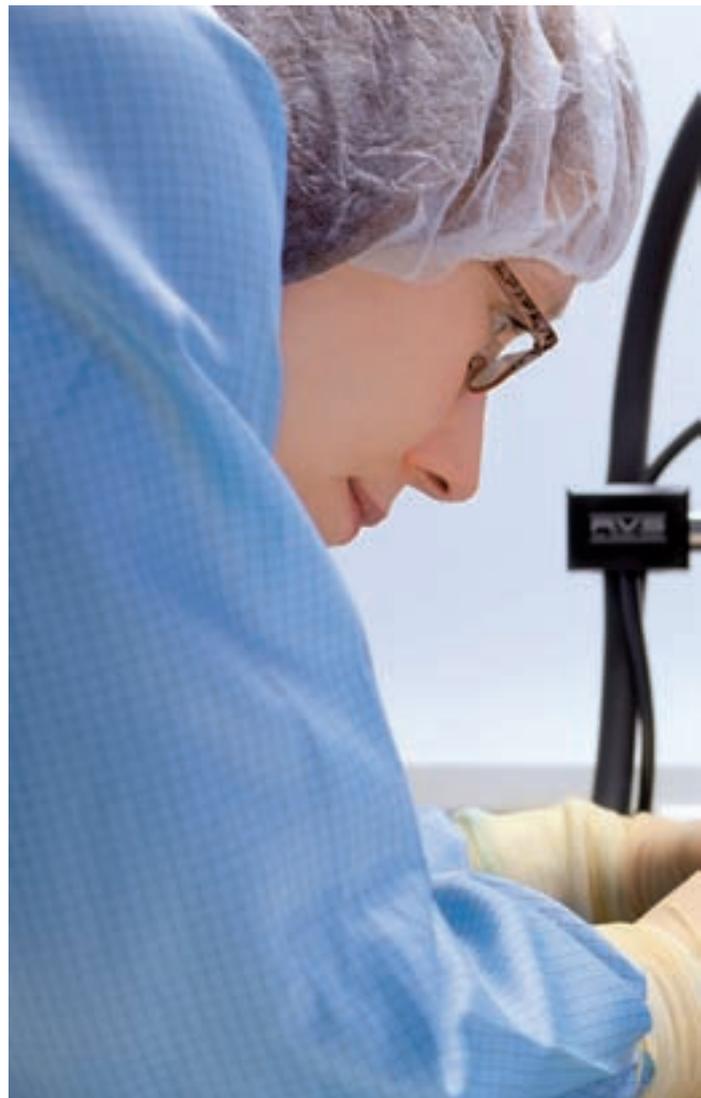
Mikrotechnische Produkte begegnen uns jeden Tag. In beinahe jedem Mobiltelefon erkennt ein Beschleunigungssensor die Lage, im Auto überwachen Drehratensensoren die Fahrstabilität. Dabei können Mikrosysteme mehr als nur Sensoren sein. Wir arbeiten an der Herstellung winziger Antriebssysteme, die kostengünstig in eine Vielzahl von Anwendungen integriert werden können. Das Spektrum reicht von Mikropositioniersystemen über winzige Mikrorelais bis hin zu Mikrowellenfiltern in der Signalverarbeitung.

## ► MEMS in Action – New Production Techniques for Micro Actuators

*We encounter Micro-Electromechanical Systems (MEMS) every day. In almost every cell phone an acceleration sensor measures the inclination, in cars the vehicle's stability is monitored by yaw rate sensors. But MEMS are more than just sensors. We develop production techniques for very small actuators, which can be cost-efficiently integrated in a wide range of applications. For example they can be used in micro positioning systems, in tiny micro relays and microwave filters for signal processing.*

**Helmut F. Schlaak, Michael Schlosser, Dirk Eicher, Matthias Staab, Anika Kohlstedt** • Die Mikrosystemtechnik (MST) hat sich mittlerweile in vielen Produkten aus den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnik, der modernen Automobilindustrie, der Medizintechnik, Biotechnologie, Konsumgüterindustrie und Optik als wichtige Schlüsseltechnologie etabliert. Ursprünglich bestand die Mikrosystemtechnik als Anwendung beziehungsweise Modifikation der Fertigungstechnologien der Silizium-Halbleitertechnik, um über die rein elektronischen Schaltkreise hinaus eine Funktionsintegration mit Mechanik, Optik und Fluidik zu ermöglichen. Für derartige Mikrosysteme gelten die Anforderungen der Feingerätetechnik: die Miniaturisierung, hohe Präzision mit Herstellungstoleranzen bis in den Mikrometerbereich bei gleichzeitiger Anbindung an die raue Umgebung der Makrowelt. Es liegt also ein typisches Multi-skalenproblem vor.

Bereits in den 1980er Jahren wurde die kristallachsenabhängige Nassätztechnik in Silizium unter der Bezeichnung Bulk-Mikromechanik vor allem in der Messtechnik (Druck, Beschleunigung) industrialisiert. Zur Erhöhung der Integrationsdichte folgte seit Beginn der 1990er Jahre die



Oberflächen-Mikromechanik auf Siliziumbasis, mit der horizontal frei bewegliche Strukturen hergestellt werden. Diese Technologie wird in-

Fachgebiet Mikrotechnik und  
Elektromechanische Systeme (M+EMS)  
Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK)  
Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak  
Tel. 06151/16-4696  
E-mail: [schlaak@emk.tu-darmstadt.de](mailto:schlaak@emk.tu-darmstadt.de)  
[www.emk.tu-darmstadt.de](http://www.emk.tu-darmstadt.de)

Charakterisierung  
eines Mikrosystems  
unter dem  
Digitalmikroskop.



#### Das Inchwormprinzip

Ein Inchworm-Aktor ist ein linearer Antrieb, der aus mehreren einzelnen Aktoren besteht. Durch abwechselndes Klemmen und Vorschieben wird eine Vorwärtsbewegung des Schlittens erzeugt. Der Name des Antriebs basiert auf der Ähnlichkeit seines Fortbewegungsprinzips mit dem einer Raupe. Durch das Inchwormprinzip lassen sich viele kleine Einzelhübe zu einem großen Stellweg addieren. Zur genauen Positionierung wird keine Positionssensorik benötigt.



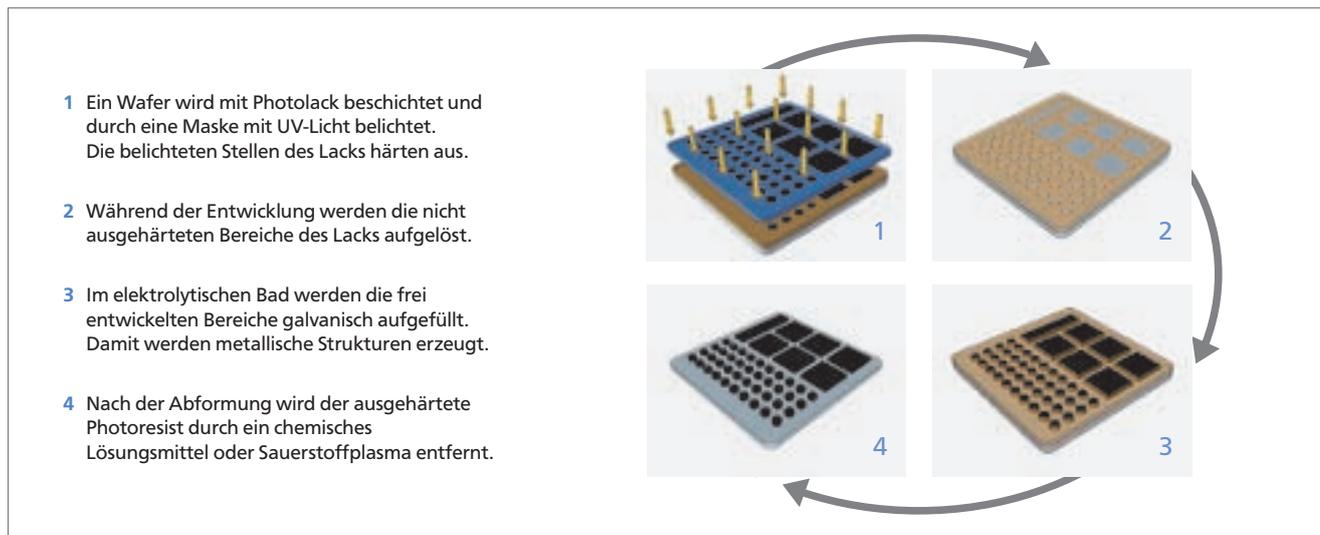
**Abbildung 1**  
Mit UV-Lithographie und Galvanoformung gefertigte Zahnräder in einem Micro Harmonic Drive® Getriebe (Micromotion GmbH, Mainz).

zwischen voll kompatibel mit den Halbleiterprozessen der CMOS-Technologie für Sensoren mit monolithisch integrierter Signalverarbeitung eingesetzt. Aufgrund der kleinen Chipabmessungen von wenigen Millimetern Kantenlänge ist diese Technologie für die Sensorik kostengünstig einsetzbar.

Funktionsbedingt weisen Mikrosysteme in der Antriebstechnik bzw. Mikroaktorik, der Mikrooptik sowie der Fluidik zum Beispiel in der Analytik und Diagnostik, Baugrößen im Zentimeterbereich auf. Andererseits erfordern die funktionsbestimmenden Abmessungen und Toleranzen eine Herstellung mit Hilfe der Mikrostrukturierung. Wegen ihrer Baugrößen sind die Silizium-basierten Technologien nicht finanzierbar. Daher werden dreidimensionale Strukturierungsverfahren mit hohem Aspektverhältnis auf kostengünstigen Substratmaterialien benötigt, die sich auf große Formate hochskalieren lassen, wie es in der Leiterplattenindustrie üblich ist.

Am Institut für Elektromechanische Konstruktionen schlagen wir die Brücke zwischen der klassischen Feinwerktechnik und der Mikrosystemtechnik. Mit den hier verwendeten mikrotechnischen Fertigungsverfahren können sowohl extrem kleine Zahnräder, zum Beispiel für die Uhrenindustrie, als auch integrierte Aktorsysteme hergestellt werden.

Mit der Kombination aus Lithographie und Galvanoformung (LiG) sowie der UV-Tiefenlithographie sind moderne Urformverfahren entstanden, mit denen Mikrobauerteile und -systeme aus den unterschiedlichsten Materialien wie Polymeren, Keramiken, Gläsern und Metallen hergestellt werden. Eines haben die mikrotechnischen Fertigungsverfahren jedoch alle gemein: Mit ihnen lassen sich eine Vielzahl von Systemen auf nur einem Substrat fertigen (Batchfertigung). Das reduziert die Bear-



beitungszeit pro System und damit auch die Kosten drastisch.

#### UV-LiG: Spanlose Herstellung kleinster Bauteile

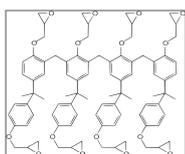
Die UV-Lithographie mit Galvanoformung (UV-LiG) ist eine Weiterentwicklung der Photolithographie, die zur Herstellung kleinster mechanischer Bauteile geeignet ist. Ein Beispiel dafür ist die Herstellung von winzigen Zahnrädern (Abbildung 1 und 2). Die mit UV-LiG erzeugten Bauteile stehen ihren feinwerktechnisch erzeugten Vorgängern in nichts nach: Als Antriebs-element in der Kamera eines Weltraumfahrzeugs werden sie zur Erkundung des Mars eingesetzt. Dabei kommt UV-LiG ganz ohne spanende Bearbeitung aus. Zunächst wird ein geeignetes Substrat mit einem Photolack beschichtet. Anschließend wird der Lack durch eine Maske hindurch belichtet. Die Maske gibt die Struktur

#### SU-8 Photolack

SU-8 ist ein Photolack der Firma MicroChem.

Es handelt sich hierbei um einen Negativ-Resist.

Das heißt, der Lack polymerisiert unter Lichteinwirkung. Nach der Entwicklung bleiben die belichteten Bereiche stehen. SU-8



besteht aus drei Grundbestandteilen: einem Epoxidharz, einem Lösungsmittel und der photoempfindlichen Komponente.

Durch die Belichtung bewirkt die photoempfindliche Komponente eine Kettenreaktion und in Folge eine Quervernetzung der Lackmoleküle. Im ausgehärteten Zustand zeichnet sich SU-8 durch eine ausgezeichnete chemische Beständigkeit und hohe Elastizität aus. Deshalb ist er sowohl als Form- als auch als Konstruktionswerkstoff in der Mikrotechnik gut geeignet.

Abbildung 2  
Prozessablauf bei der UV-LiG.

der zu erzeugenden Bauteile vor. Belichtete Bereiche des Photolacks vernetzen und härten aus. Bereiche, in denen die Maske das Licht zurückhält, werden im Entwicklungsschritt herausgelöst. Dadurch entstehen Mikroformen, die durch galvanische Abscheidung mit Metall gefüllt werden. Dabei sind auch äußerst komplexe Formen möglich. Abschließend wird der ausgehärtete Photolack



**Helmut F. Schlaak** ist seit 1999 Professor an der TU Darmstadt am Fachbereich Elektro- und Informationstechnik. Er leitet das Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme (M+EMS) am Institut für Elektromechanische Konstruktionen.



**Michael Schlosser** arbeitet seit 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet M+EMS. Er beschäftigt sich mit der Galvanoformung von Nickel und der Entwicklung galvanisch abgeformter elektrostatischer Wanderkeilantriebe.



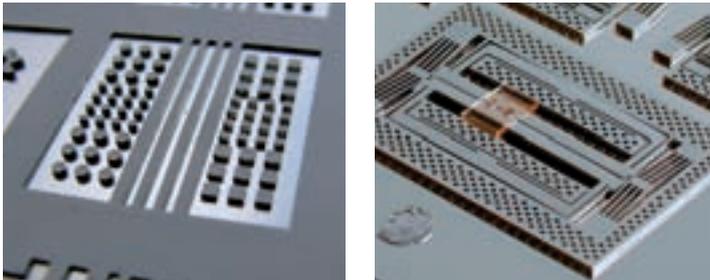
**Dirk Eicher** arbeitete von 2003 bis 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet M+EMS. Er beschäftigte sich mit der Entwicklung von mikro-mechanischen Schrittantrieben aus SU-8.



**Matthias Staab** ist seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet M+EMS. Er beschäftigt sich mit der Entwicklung mikrotechnisch gefertigter Relais für Telekommunikationsanwendungen.



**Anika Kohlstedt** arbeitet seit 2008 als Stipendiatin am Fachgebiet M+EMS. Sie beschäftigt sich mit der Entwicklung von mikromechanisch abstimmbaren Filtern für Mikrowellenhohlleiter.



mit Hilfe eines Lösungsmittels oder im Sauerstoffplasma entfernt. Die erreichbaren Toleranzen liegen im Bereich einiger Mikrometer. Der ganze Prozess dauert selbst für eine große Anzahl einzelner Bauteile nur wenige Stunden.

#### UV-Tiefenlithographie:

##### Polymere Werkstoffe für Mikroantriebe

Ein neues Feld der Mikrosystemtechnik ist die Herstellung von Mikroaktoren. Die Bewegung dieser kleinen Aktoren kann zum Beispiel für Positionierungsaufgaben, zum Schalten von winzigen Relais oder zum Einstellen integrierter Mikrowellenfilter in der Signalverarbeitung genutzt werden. Dabei sind Kräfte von bis zu 100 mN erforderlich. Skalierungsbedingt sind für solche Kräfte Mindestgrößen von 500  $\mu\text{m}$  bis einige mm notwendig. Die etablierten Technologien zur Her-

#### Abbildung 3

Mit UV-LiG hergestellte Nickel-Formteile auf einem Edelstahlsubstrat.

#### Abbildung 4

Mikromechanisch hergestellter Mikropositionierantrieb (Inchwormantrieb) aus SU-8.

#### Literatur

[1] Schlosser, M.; Staab, M.; Schlaak, H. F.; Nasschemisches Entfernen dicker SU-8 Schichten aus galvanisch abgeschiedenen Strukturen, Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik – 2. GMM-Workshop Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik, Darmstadt, Germany, 2010

[2] Eicher, D.; Schlaak, H.F.; Elektrothermische Aktoren aus SU-8 für den Einsatz in miniaturisierten Schrittantrieben, Mikrosystemtechnik-Kongress, Dresden, Germany, 2007, S. 195–198

[3] Eicher, D.; Hamel, S.; Schlaak, H. F.; Bistable Clamping Mechanism for Use in a Microstructured ELECTROTHERMAL Inchworm Platform, 53. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK 2008), Ilmenau, Germany, 2008

[4] Kohlstedt A; Schlaak, H. F.; Tiefenlithographieprozess für SU-8-Dickschicht-Funktionsstrukturen auf FR4-Leiterplattenmaterial, 2. GMM-Workshop Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik, Darmstadt, Germany, 2010

[5] Kohlstedt A; Schlaak, H. F.; Design for Micromechanically Tuneable Microwave Hollow Waveguide Devices; Actuator 2010, Bremen, 2010



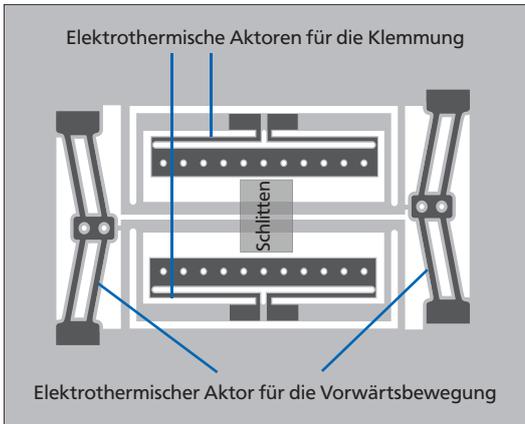
Es gibt Geräusche,  
die am **Image** kratzen.



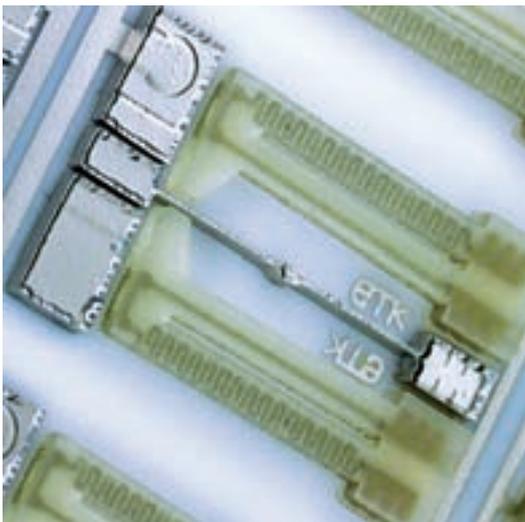
Selbst winzige Ursachen entfalten oft große Wirkung. Eine kleine Unwucht entpuppt sich auf diese Weise schnell als Geräuschbelästigung im Alltagsbetrieb und zum Makel eines ansonsten tadellosen Produkts. Ob groß oder klein – bei einer Vielzahl von Komponenten lassen sich durch Auswuchten störende Vibrationen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

 **SCHENCK**  
THE ART OF ROTATION

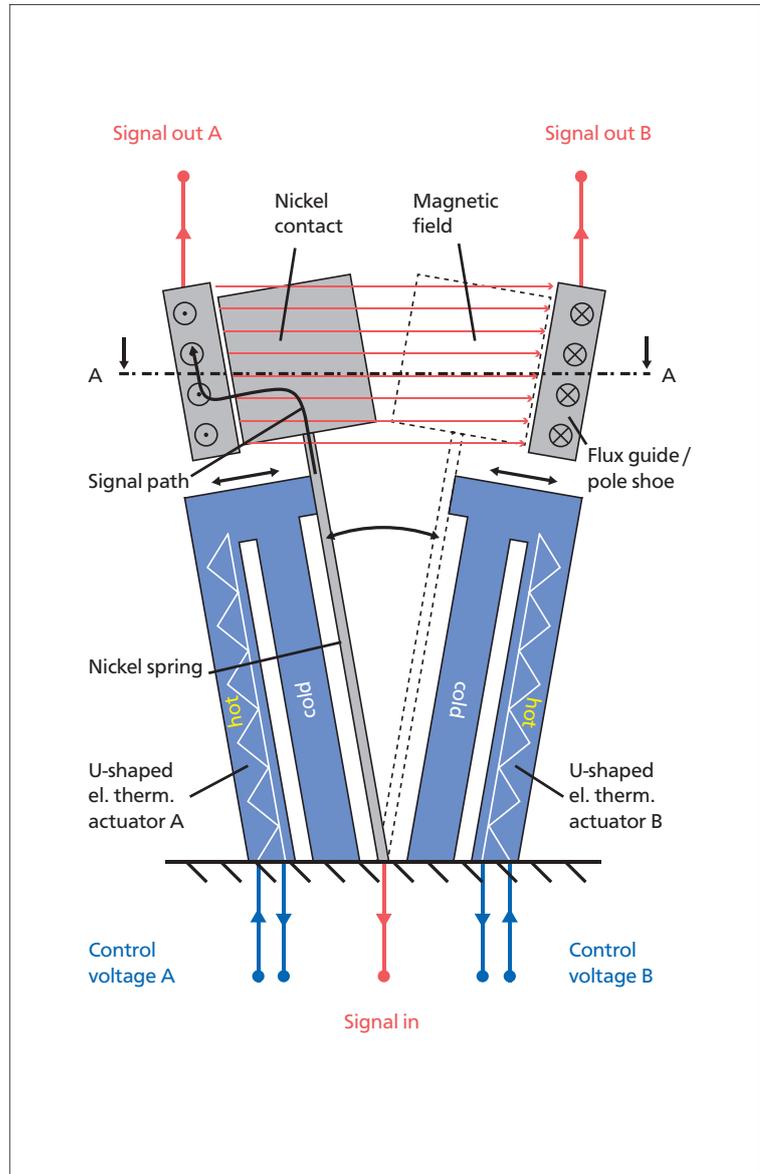
The  Group



**Abbildung 5**  
Prinzipskizze des mikrotechnischen Mikropositionierantriebs.



**Abbildung 6**  
Mittels UV-Tiefenlithographie hergestelltes Mikrorelais.



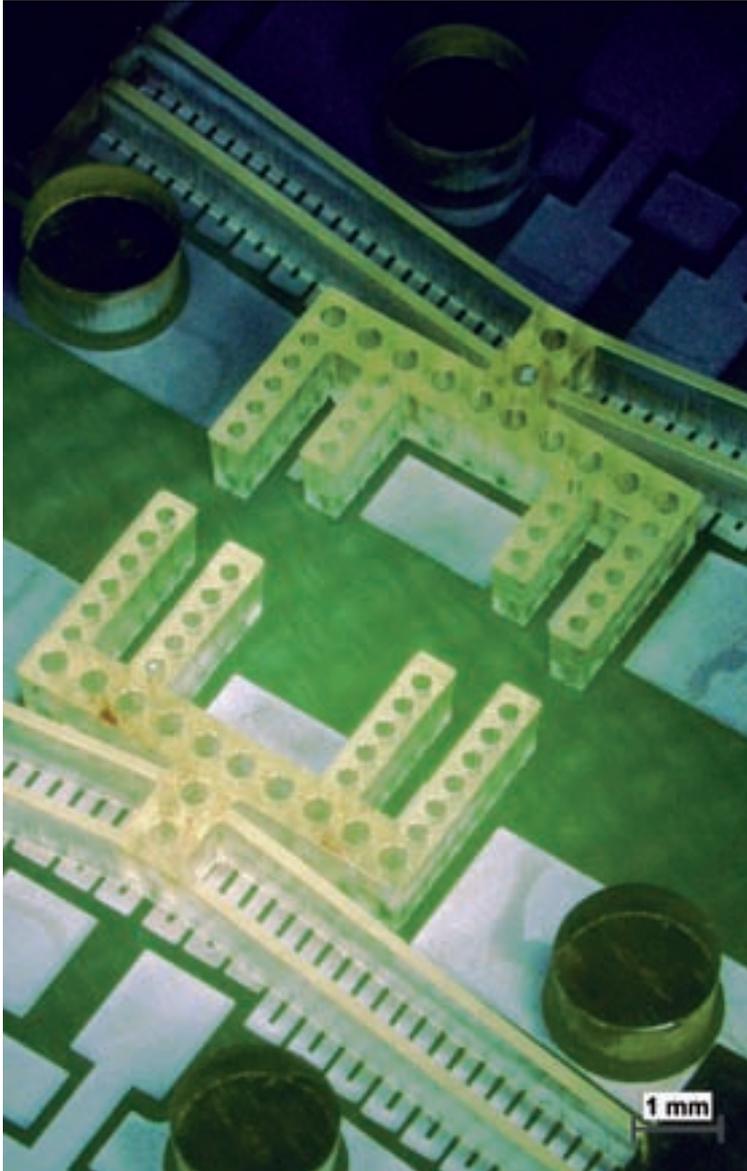
**Abbildung 7**  
Funktionsprinzip des Mikrorelais.

entstehen Auslenkungen von bis zu  $100\ \mu\text{m}$ , die eine Kraft von bis zu  $100\ \text{mN}$  erzeugen können. Diese Antriebe nennt man Elektrothermische Aktoren (ETA).

stellung von Mikrosystemen aus Silizium sind für die Herstellung von preiswerten Mikroaktoren daher nicht mehr geeignet. Am Institut EMK werden Mikroantriebe entwickelt, die aus dem Epoxid-basierten Photolack SU-8 bestehen. Das Verfahren ist dabei ähnlich wie die UV-LiG, der Photolack dient jedoch nicht nur als verlorene Form sondern als Funktionsmaterial. Auf Grund seines hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und seiner ausgezeichneten mechanischen Stabilität eignet sich SU-8 zur Herstellung von nachgiebigen Mikrofeder-Strukturen. Ein Mikroheizer erwärmt diese Strukturen um ca.  $100\ \text{K}$ . Dadurch

### Mikroschrittmotor

Kombiniert man mehrere ETA miteinander, so lässt sich ein Mikroschrittantrieb herstellen (Abbildung 5). Abwechselnd werden die Aktoren so angesteuert, dass sich ein Schlitten schrittweise fortbewegt (Inchwormprinzip). Aufgrund der Bauweise können mehrere Schritte in einer Sekunde durchgeführt und Kräfte von mehreren hundert mN erzeugt werden. Die Positioniergenauigkeit des Schlittens beträgt dabei nur wenige  $\mu\text{m}$ . Auch dieser Antrieb lässt sich mittels UV-Tiefenlithographie in wenigen Prozessschritten herstellen. Anwenden lässt sich ein solcher Antrieb zum Beispiel in der

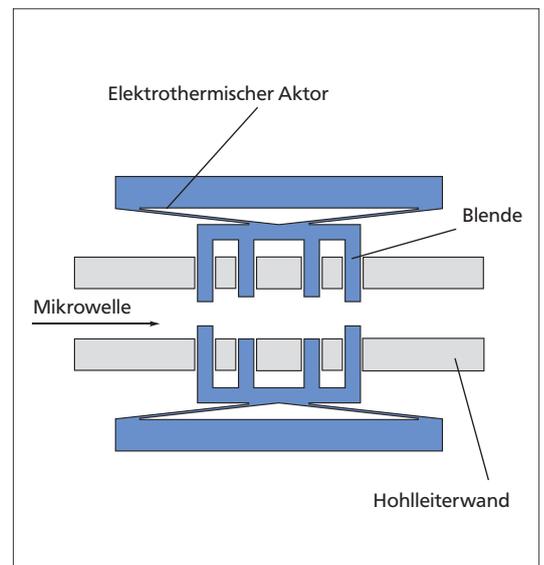


**Abbildung 8**  
Mikromechanisch  
abstimmbares  
Mikrowellenfilter  
aus SU-8.

Biotechnologie und in der Medizintechnik zur Dosierung von Medikamenten.

#### Mikrorelais

Ein weiteres Einsatzgebiet für ETA ist die Ansteuerung eines bistabilen mikrotechnischen Relais (Abbildung 6 und 7). Dabei drückt ein erwärmter elektrothermischer Biegeaktor einen beweglichen Kontakt gegen einen festen. Nach dem Abkühlen nimmt der Aktor wieder seine Ausgangsposition ein. Die Kraft, die nötig ist den Kontakt geschlossen zu halten, wird durch einen Permanentmagneten aufgebracht. Das Mikrorelais hat eine Fläche von ca. 21 mm<sup>2</sup> und kann Ströme von deutlich mehr als 1 A schalten. Im Gegensatz zu ihren feinwerktechnisch gefertigten Pendanten benötigt dieses Mikrorelais keine Spulen und kann in Batchfertigung preiswert hergestellt werden.



**Abbildung 9**  
Funktionsprinzip des  
Mikrowellenfilters.

#### Integriertes Mikrowellenfilter

Mit Hilfe der UV-Tiefenlithographie lassen sich Hohlwellenleiter für Mikrowellen realisieren. Werden zwei bewegliche Blenden in den Hohlwellenleiter integriert, lässt sich damit ein einstellbares Mikrowellenfilter realisieren (Abbildung 8 und 9). Zum Antrieb der Blenden kommen wieder ETA zum Einsatz. Die Antriebe und der Hohlwellenleiter können in einem Schritt mit derselben Technologie (UV-Tiefenlithographie in SU-8) hergestellt werden.

#### Ausblick

UV-LiG und die UV-Tiefenlithographie stellen Werkzeuge zur Verfügung, mit denen sich eine Vielzahl mechanischer Elemente auf einem Substrat herstellen lassen. Dabei ist man nicht auf teure Silizium-Substrate angewiesen, sondern kann auf preiswerte Kunststoffe oder Keramiken zurückgreifen. Ein am Institut vielfach erprobtes Substratmaterial ist PCB (Leiterplattenmaterial). Damit ergibt sich eine klare Zukunftsvision: Die Integration mikromechanischer Systeme direkt in eine elektronische Schaltung auf einer Leiterplatte, den Systems-on-PCB.

# Metal-Keramik- Verbundwerkstoffe mit Durchdringungsgefüge

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Materialwissenschaftler, was Umweltverträglichkeit, Energieersparnis, Rohstoffverknappung, aber auch Kostenersparnis betrifft, werden seit rund 30 Jahren gezielt Werkstoffe für bestimmte Anforderungen entwickelt. Verbundwerkstoffe bestehen aus zwei oder mehreren festen Phasen unterschiedlicher Werkstoffklassen wie Polymere, Metall, Glas oder Keramik. Jeder kennt aus dem täglichen Gebrauch Werkstücke aus Verbundwerkstoffen wie glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkten Polymeren. Auch Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe sind vielen vertraut, wie etwa Werkzeuge aus Hartmetall.

## ► Ceramic – Metal Composites and their Application

*In the last 30 to 40 years, materials scientists have been challenged to develop tailored materials to meet demands concerning environmental friendliness, energy savings, raw materials shortages as well as reducing production costs. Composites consist of two or more solid phases of different classes of materials, like polymers, metals, glasses and ceramics. Everyone is familiar with the everyday use of items made of composites, for example glass fibre or carbon fibre reinforced polymers. Many are also familiar with metal-ceramic composites, for example the so-called hard metals. They consist mostly of tungsten carbide, or more exactly tungsten carbide particles embedded in a cobalt matrix.*

**Jürgen Rödel, Ludwig Weiler, Jami Susan Winzer, Irene Mieskes** • Ein wesentliches Motiv für die Entwicklung von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen ist die Kombination von besonderen Eigenschaften der beiden Werkstoffklassen. Für hohe Verschleißfestigkeit, Zuverlässigkeit und Standzeit in Press- und Stanzwerkzeugen sowie in Bremsen sind die Zähigkeit von Metallen und die Härte von Keramik vorteilhaft. Für die Kühlung in der Leistungselektronik sind Teile hoher Wärmeleitfähigkeit und ein thermischer Ausdehnungskoeffizient nahe dem des Siliziums sehr günstig, zum Beispiel AlSiC, bestehend aus der Kombination von Aluminium und Siliziumcarbid. Allgemein lassen sich in der Verbindung verschiedener Werkstoffklassen Profile thermomechanischer Eigenschaften erreichen, die mit einer Werkstoffklasse nicht zu erzielen sind. Die Eigenschaften von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen werden wesentlich von der chemischen Zusammensetzung, vom Volumenverhältnis und von Form und Größe der beiden Phasen bestimmt.

Gasdruckinfiltrations-  
ofen zur Herstellung  
von Metall-Keramik-  
Verbundwerkstoffen.

Allgemein unterscheidet man Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix (MMC), mit Keramikmatrix (CMC) und mit Durchdringungsgefüge (Abbildung 1).

### Herstellung allgemein

Die Herstellungsverfahren von Bauteilen aus Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen werden hauptsächlich vom Typ des Verbundwerkstoffs bestimmt. Für Werkstoffe mit Metallmatrix sind dies schmelz- und pulvermetallurgische Prozesse und für Werkstoffe mit Keramikmatrix sind Keramikherstellungsverfahren mit Sintern dominierend. Die Vorteile von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen im Vergleich zu Leichtmetallen liegen in der Tatsache begründet, dass Verbundwerkstoffe die guten Eigenschaften der Leichtmetalle beibehalten und einige der negativen Eigenschaften mindern. Im Aluminium-Motorblock des Porsche Boxster (seit 1996 auf dem Markt) sind anstelle herkömmlicher Grauguss-Büchsen Zylinderlaufflächen aus einem Aluminium-Silizium-Verbund. Die hochporöse Preform besteht nur zu etwa 25 Volumenprozent aus Silizium-Partikeln und bildet zusammen mit der Aluminium-Matrix im Motorblock eine äußerst abriebfeste Lauffläche. Die lokal verstärkten Bereiche im Gesamtbauteil erlauben eine kompaktere Bauweise, da die Stege zwischen den Zylindern auf weniger als 5 Millimeter reduziert werden können. Auch an anderer Stelle in der Automobilherstellung könnten die Leichtgewichte aus Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen schon bald herkömmliche Werkstoffe ablösen. Denkbar sind Keramik-Verstärkungen an Komponenten wie Bremsbelagträgerplatten (Gewicht), Lagern (Wärmedehnung), oder Pleuelstangen (Gewicht). Für die Elektroindustrie interessant sind Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe aus Siliziumcarbid und

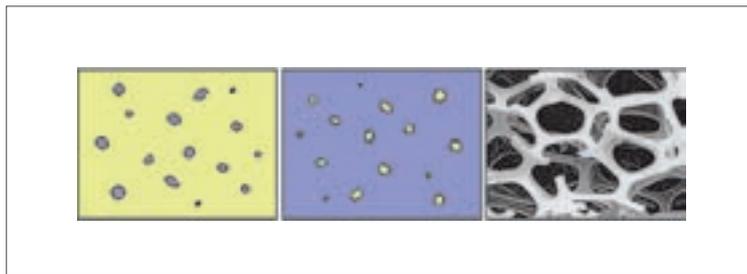
### Literatur

Studart, A. R.; Gonzenbach, U. T.; Tervoort, E. & Gauckler, L. J., Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, 89, 1771–1789

Lange, F. F., Velamakanni, B. and Evans, A., Method for processing metal-reinforced ceramic composites. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, 73, 388–393

Travitzki, N. & Claussen, N., Microstructure and Properties of Metal Infiltrated RBSN Composites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1992, 9, 61–65





**Abbildung 1**

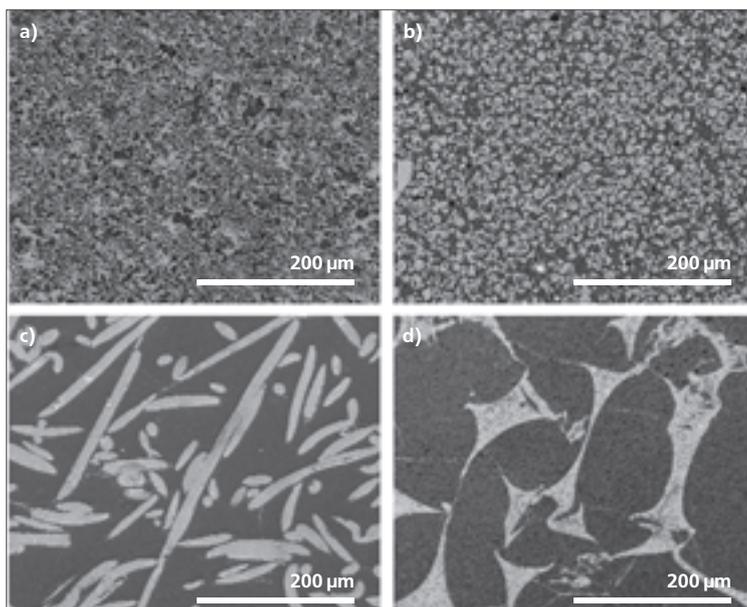
Schematische Darstellung der Typen von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen.  
links: Metallmatrix mit eingelagerten Keramikpartikeln (MMC),  
Mitte: Keramikmatrix mit eingelagerten Metallpartikeln,  
rechts: Durchdringungsgefüge.

Aluminium. Sie dienen dort zur Wärmeableitung und weisen gegenüber anderen Lösungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit einen an das Aluminiumoxid- oder Aluminiumnitrid-Substrat angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Sie werden in der Raumfahrt, der Flugzeugindustrie, im Motorenbau und bei der Bahnindustrie angewandt.

#### Vorteile und Herstellung von Verbundwerkstoffen mit Durchdringungsgefüge

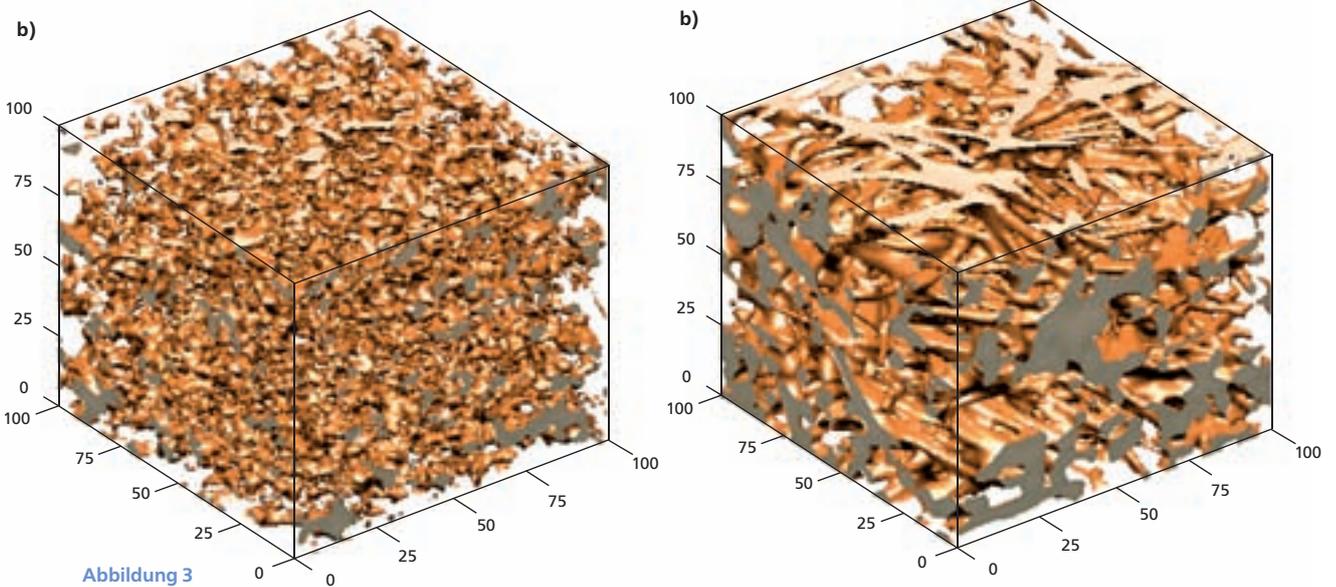
Im Vergleich zu CMC oder MMC haben Keramik-Metall-Verbundwerkstoffe mit Durchdringungsgefüge wesentliche Vorteile. Die Eigenschaften, die man kombinieren möchte, sind kontinuierlich durch das ganze Bauteil vorhanden, zum Beispiel hohe Steifigkeit in Kombination mit hoher Wär-

meleitfähigkeit. Dafür kann die Herstellung etwas komplizierter sein. Wenn Keramik und Metall mit ähnlichen Schmelzpunkten kombiniert würden, könnten beide in Pulverform zusammengemischt und anschließend gesintert werden. Kontinuität beider Phasen ist gewährleistet, wenn beide jeweils zu mindestens 30 Vol. % eingesetzt werden. Da aber in den meisten Fällen der Schmelzpunkt von Metall viel niedriger als der der Keramik-Komponente ist, wird zuerst eine poröse Keramik hergestellt und anschließend mit flüssigem Metall infiltriert. Eine empfehlenswerte Übersicht über verschiedene Herstellungsmethoden von porösen Keramiken geben Studart et al. Falls das Metall die Keramik benetzt, kann die Metallinfiltration unter Vakuum spontan erfolgen. Falls nicht, muss die Me-



**Abbildung 2**

REM Gefügebilder von  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$  Verbundwerkstoffen. Der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil wurde über  
a) Teilsintern und die Verwendung diverser Opfervorformen sowie  
b) Maisstärke,  
c) Wollefilz und  
d) PU-Schaum hergestellt.



**Abbildung 3**  
 Dreidimensionale Bilder des Kupfernetzwerkes von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbundwerkstoffen, hergestellt auf der Basis von  
 a) Maisstärke und  
 b) Wollefilz.  
 Beide Verbundwerkstoffe enthalten 30 Vol. % Kupfer.

tallinfiltration unter Druck geschehen. Zwei verschiedene Methoden sind Gießpressen und Gasdruck-Infiltration. Im Fachgebiet NAW wird poröses Aluminiumoxid entweder durch Teilsintern oder mit Hilfe einer Opfervorform (Porenbildner) hergestellt. Als Opfervorform wurde Stärke (sphärische Partikel) mit verschiedenen Korngrößen, Wollefilz und Polyurethan (PU)-Schaum verwendet. Die Opfervorform wurde mit einem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schlicker (Pulver in Wasser dispergiert) gemischt und getrocknet. Danach wurde diese pyrolysiert, sodass nur noch  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix übrig blieb, und anschließend gesintert. Das resultierende Porennetzwerk bildet dann ein Replika der Opfervorform. Die porösen Keramiken wurden sodann mit Kupfer unter Gasdruck (10 MPa) infiltriert (Abbildung 2). Röntgentomographie er-

möglicht die Darstellung des Gefüges in drei Dimensionen. In Abbildung 3 sind die Kupfernetzwerke von a) stärke- und b) wollefilzbasierten Ver-

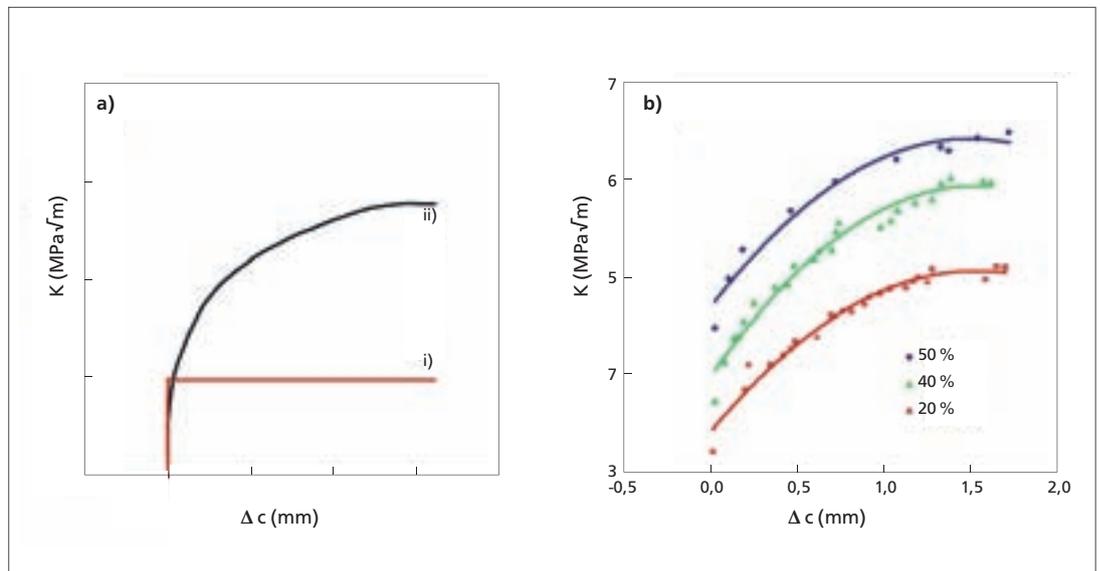
**Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe**  
 Prof. Dr. Jürgen Rödel  
 Tel. 06151/16-6315  
 E-Mail: roedel@ceramics.tu-darmstadt.de

Dr. Ludwig Weiler  
 Tel. 06151/16-6268  
 E-Mail: weiler@ceramics.tu-darmstadt.de

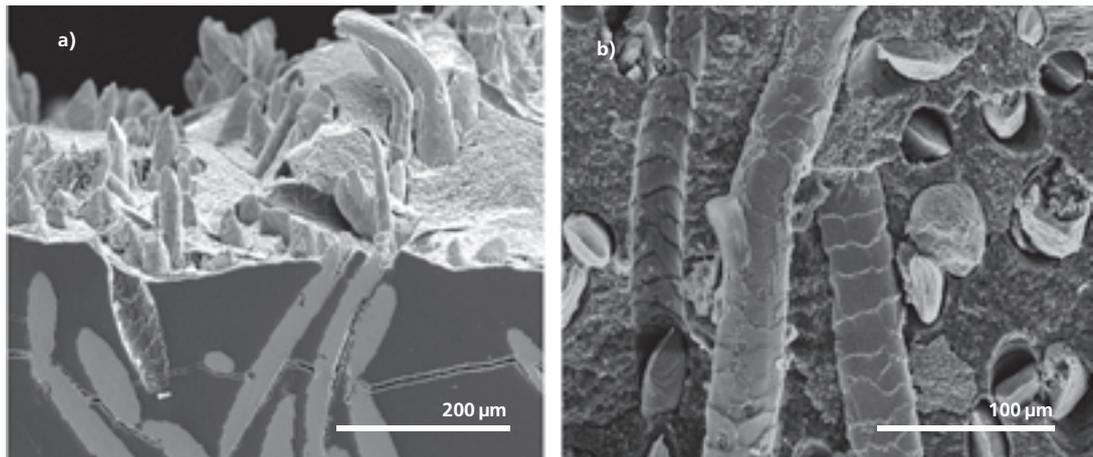
Irene Mieskes  
 Tel. 06151/16-6313  
 E-Mail: mieskes@ceramics.tu-darmstadt.de

Jami Susan Winzer  
 Tel. 06151/16-5542  
 E-Mail: winzer@ceramics.tu-darmstadt.de  
[www.mawi.tu-darmstadt.de/nav/](http://www.mawi.tu-darmstadt.de/nav/)

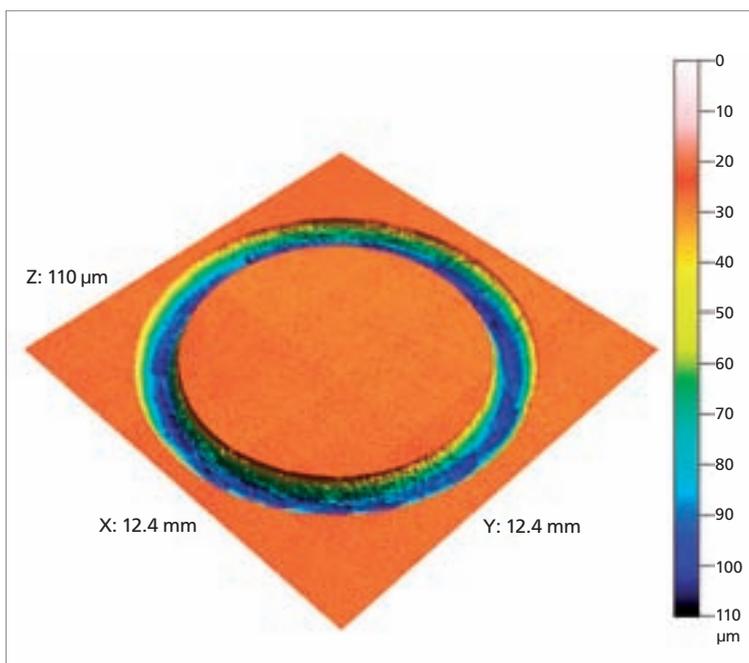
**Abbildung 4**  
 R-Kurven:  
 a) schematisch und  
 b) für  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbundwerkstoffe mit verschiedenen Kupfer-Volumenanteilen.



**Abbildung 5**  
Fractographische  
Bilder eines  
wollebasierten  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbund-  
werkstoffs  
a) von der Seite  
und  
b) von oben.



**Abbildung 6**  
Verschleißspur  
eines  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbund-  
werkstoffs,  
aufgenommen  
mit einem  
konfokalen Weiß-  
lichtmikroskop.



bundwerkstoffen zu sehen. Der durchsichtige Teil ist  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

#### Eigenschaften von Aluminiumoxid-Kupfer

Die Kombination Aluminiumoxid-Kupfer wurde ausgewählt, um die hohe Steifigkeit und Härte von Aluminiumoxid mit der hohen Wärmeleitfähigkeit und Risszähigkeit von Kupfer zu vereinen. Von besonderem Interesse für die Zuverlässigkeit eines

Werkstoffes ist die Risszähigkeit. In Abbildung 4a sind zwei schematische R-Kurven dargestellt – der Spannungsintensitätsfaktor  $K$  gegen Änderung der Risslänge  $c$ . Kurve i) zeigt keine Erhöhung des  $K$ -Wertes mit zunehmender Risslänge. So eine Kurve ist typisch für spröde, unverstärkte Gläser oder Keramiken. Bei Werkstoffen, die mit Metallligamenten verstärkt sind, erhöht sich der  $K$ -Wert mit zunehmender Risslänge, da der Riss nach und nach durch Metallligamente überbrückt wird, die dem Risswachstum widerstehen. Irgendwann reißt das erste Ligament, und wenn der Riss in die weiteren Ligamente wächst, brechen die Ligamente am Ende des Risses. Es entsteht eine Gleichgewichtszahl von Ligamenten, die den Riss überbrücken, und es gibt ein Plateau in der R-Kurve.

In Abbildung 4b sieht man die R-Kurven eines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbundwerkstoffs mit verschiedenen Kupferanteilen (in Volumenprozent). Je mehr Kupfer enthalten ist, desto höher wird die R-Kurve, da mehr Energie verbraucht wird, um die Kupferligamente plastisch zu verformen. Der Plateauwert wird in allen Fällen nach ca. 1,5 mm Risswachstum erreicht. Abbildung 5 zeigt die Bruchfläche a) von der Seite und b) von oben. Die Kupferligamente haben sich sehr weit gedehnt, bevor sie rissen und/oder herausgezogen wurden. Man sieht auch Einschnürungen in den Ligamenten und Delaminationen zwischen Cu-Ligamenten und der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Matrix. Es ist auch interessant zu beobachten, wie genau die Kupferligamente die Struktur des Wollefilzes übernommen haben: nicht nur die Form, sondern auch sogar die Oberflächenstruktur (Abbildung 5b). Die

Verschleißfestigkeit einer Auswahl von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-Verbundwerkstoffen wurde getestet. Abbildung 6 zeigt eine Verschleißspur. Es gibt eine Korrelation zwischen Risszähigkeit und Verschleißbeständigkeit: je höher die Risszähigkeit, desto höher die Verschleißbeständigkeit.

#### Offene Fragen und weitere Entwicklung

Die Entwicklung neuer Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe wird hauptsächlich bestimmt durch gewünschte und notwendige höhere Leistungsprofile und durch die Notwendigkeit, gebräuchliche Werkstoffe zu ersetzen, soweit deren Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit usw. begrenzt sind. Weitere Bereiche der MKV-Forschung betreffen die Erzielung feinerer Gefüge durch Verwendung kleinerer Partikel (Nanopartikel), die Vertiefung des Verständnisses der makroskopischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den chemischen und physikalischen Eigenschaften/Charakteristika der einzelnen Phasen und insbesondere der Phasengrenzen sowie – daraus folgend – die gezielte Einstellung bestimmter makroskopischer Eigenschaften.



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



**Ludwig Weiler** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt. Er ist Wissenschaftler i. R. und arbeitet am EU-Projekt MATRANS.



**Irene Mieskes** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Darmstadt. Die Diplom-Physikerin arbeitet am EU-Projekt MATRANS an Aluminiumoxid-Kupfer gradierten Verbundwerkstoffen.



**Jami Susan Winzer** ist Doktorandin an der TU Darmstadt. Sie steht kurz vor der Vollendung der Promotionsarbeit zum Thema Herstellung und Charakterisierung von Aluminium-Kupfer-Verbundwerkstoffen.

— ANZEIGE



PWT

## Wasser ist unsere Leidenschaft

*dazu brauchen wir  
Sie als Ingenieur/in*

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

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



# Profile und Schalenstrukturen aus verzweigten Blechen

Die Herstellung integral verzweigter Bleche aus Stahl stellte die Fertigungstechnologie bislang vor große Schwierigkeiten. Mit dem Umformverfahren Spaltprofilieren ergibt sich die Möglichkeit, Bleche ausgehend von den Bandkanten beidseitig zu verzweigen. Die so hergestellten Halbzeuge dienen in der Weiterverarbeitung zur Herstellung innovativer verzweigter Profile und Schalenstrukturen. Der folgende Beitrag beschreibt die interdisziplinäre Kooperation im Sonderforschungsbereich 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung“ zur Entwicklung, Fertigung, Bewertung und Anwendung neuartiger, verzweigter Bauteile.

## ► Profiles and shell-structures made of bifurcated sheet metal

*Manufacturing bifurcated profiles in integral style has been sophisticated up to now. With the technology of linear flow splitting a new possibility is given to branch sheet metal from the bend edge. These new semi-finished parts can be used for the manufacturing of innovative profiles and shell structures. The following paper gives an overview of the interdisciplinary collaborative research center 666 "Integral sheet metal design with higher order bifurcations" in fields of development, manufacturing, characterization and application of new branched structures.*

### Peter Groche, Stefan Ulbrich, Wolfram Schmitt •

Zu Beginn des Jahres 2007 titelte die Darmstädter Lokalpresse: „Funktionsbau mit Haifischkiemen – Sonderforschungsbereich 666 bekommt neue Versuchshalle für integrale Blechbauweisen“. Mittlerweile ist das nach bionischem Vorbild gestaltete Gebäude für Besucher des TU-Standortes Lichtwiese keine Neuheit mehr. Dennoch wird im interdisziplinären Sonderforschungsbereich 666 nach wie vor die Thematik der „Integralen Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung“ auf den Gebieten der Produktentwicklung, Fertigung, Materialcharakterisierung und Anwendung stark vorangetrieben. Ein sehr gutes Zeugnis für die erarbeiteten Innovationen bekam der Projektverbund aus Maschinenbau, Materialwissenschaften, Mathematik und Bauingenieurwesen im Jahr 2009, als die beantragte zweite Förderperiode mit gesteigener Zahl an Teilprojekten seitens der Deutschen Forschungsgemeinschaft bis 2013 bewilligt wurde.

Eine Erhöhung des Verzweigungsgrades ist für Produkte aus Blech vor dem Hintergrund des Stabi-

Gesamtanlage zur Herstellung integral verzweigter Profile.





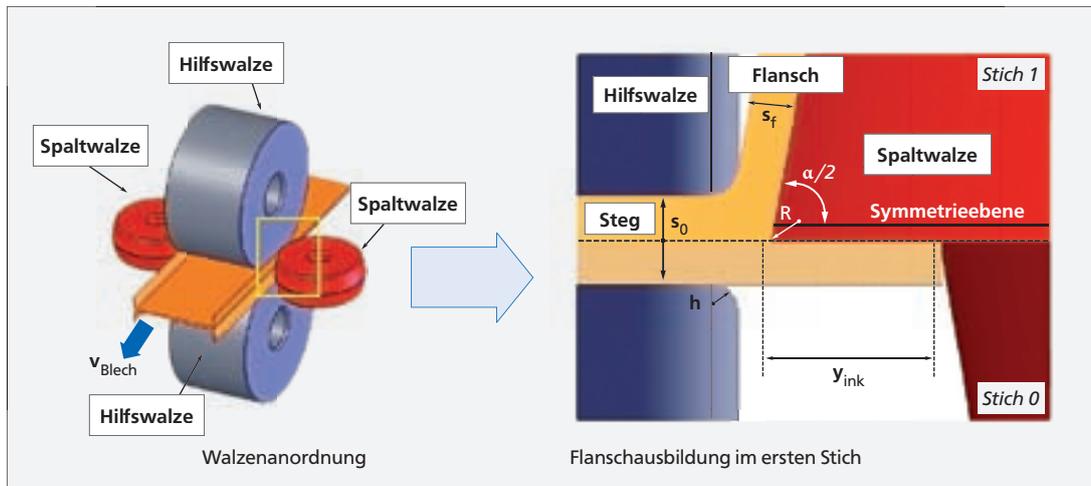


Abbildung 1  
Verfahrensprinzip  
Spaltprofilieren.

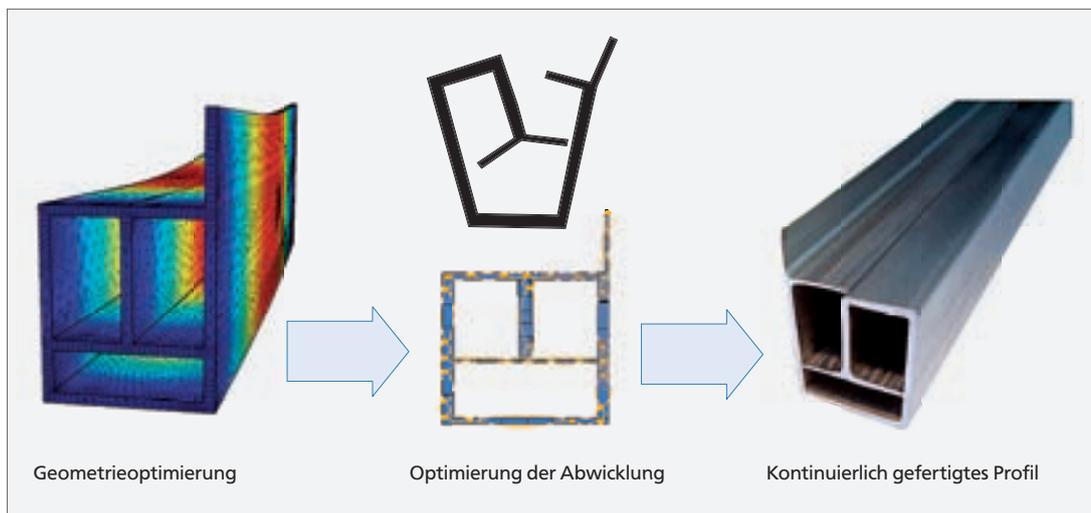


Abbildung 2  
Optimierung eines  
Dreikammerprofils.

litätszugewinns bei gleichbleibendem Gewicht und der mehrzweckoptimierten Nutzung mehrerer entstehender Kammern sehr wünschenswert. Allerdings steigt mit dem Verzweigungsgrad der Fertigungsaufwand für die gewünschten geome-

#### Sonderforschungsbereiche

Sonderforschungsbereiche (SFB) sind langfristige, in der Regel auf die Dauer von bis zu zwölf Jahren angelegte Forschungseinrichtungen der Hochschulen, in denen wissenschaftliche Zusammenarbeit im Rahmen fächerübergreifender Forschungsprogramme durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Jeder SFB besteht dabei aus einer unterschiedlichen Anzahl von Teilprojekten, die von einzelnen ggf. aber auch von mehreren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gemeinsam geleitet werden. Im SFB 666 arbeiten 11 Teilprojektleiter und 24 wissenschaftliche Mitarbeiter in 18 Teilprojekten. Das Projekt existiert seit 2005 und befindet sich aktuell in der 2. Förderperiode.

trischen Ausprägungen drastisch an. Bereits die Herstellung eines einfachen T-Profiles aus dünnem Blech in integraler Bauweise ohne Materialdopplung stellt die heutige industrielle Produktionstechnik vor Schwierigkeiten. Allenfalls differentielle Bauweisen mit hinsichtlich funktionaler Anforderungen durch Fügeprozesse häufig nachteilig ausgebildeten Eigenschaften oder Materialdopplungen mit erheblichem Mehraufwand des einzusetzenden Materials erlauben heute die Realisierung von dünnwandigen, verzweigten Blechstrukturen. Das neuartige Umformverfahren Spaltprofilieren liefert hierzu einen vollständig neuen Ansatz.

Mittels eines Werkzeugsystems, bestehend aus je zwei stumpfwinkligen Spaltwalzen und unterstützenden Hilfswalzen, wird ein ebenes Blech bei Raumtemperatur in diskreten Stufen durch einen Umformprozess gespalten. Durch ein Auseinanderfließen des Werkstoffs wird die Oberfläche der Bandkante stark vergrößert und es bilden sich Verzweigungen aus (Abbildung 1)

[1]. Das derart umgeformte Spaltprofil stellt ein innovatives Halbzeug zur Herstellung neuartiger Profil- und Schalenbauweisen dar. Die wissenschaftlichen Tätigkeiten des Sonderforschungsbereichs 666 beleuchten integral verzweigte Blechstrukturen aus den Blickwinkeln der durchgängigen Prozesskette Entwicklung – Fertigung – Bewertung – Anwendung.

#### Neue Methoden der Produktentwicklung

Im Bereich der durchgängigen, algorithmisierten Produktentwicklung werden neuartige Methoden und Verfahren generiert, die es ermöglichen, Anforderungen an Mehrkammerprofile systematisch zu sammeln und für eine nachfolgende mathematische Optimierung nutzbar zu machen [2, 3]. Die optimale Geometrie wird dabei mit Hilfe von Methoden aus der diskreten und der nichtlinearen Optimierung ermittelt. Hierfür wurden neue Methoden wie etwa Branch-and-Bound Ansätze [4] oder Verfahren zur PDE-restringierten Optimierung [5, 6] entwickelt und angewendet. Als Zielfunktionen können hierbei abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall beispielsweise minimale Profildurchbiegung, maximale Torsionssteifigkeit, maximaler Wärmeaustausch oder minimales Gewicht festgelegt werden (Abbildung 2). Durch die zusätzliche Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen wird gewährleistet, dass optimierte Profilquerschnitte mittels der im Bereich Fertigung entwickelten Anlage kontinuierlich hergestellt werden können [7].

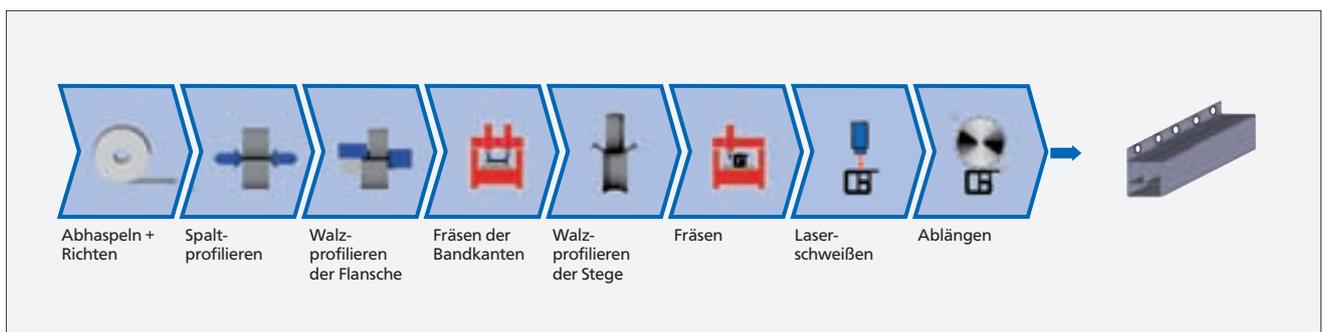
**Abbildung 3**  
Prozesskette zur Herstellung eines Dreikammerprofils.

#### Kontinuierliche Fertigung verzweigter Profile

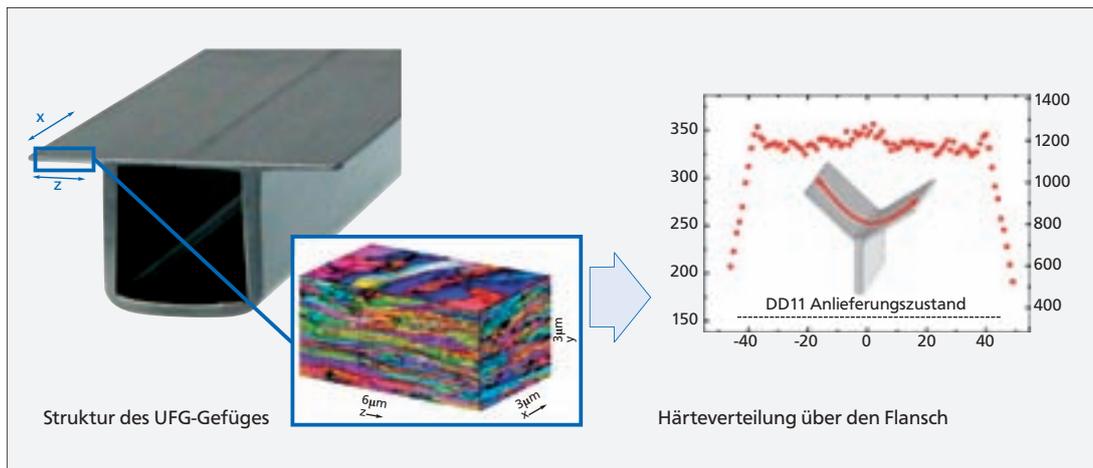
Das Anlagenkonzept kombiniert umformtechnische, zerspanende und fügende Fertigungs-

#### Literatur

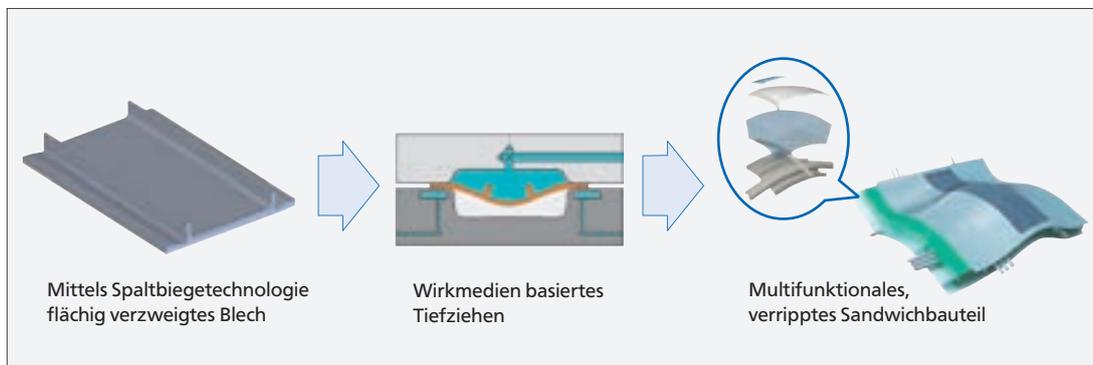
- [1] Groche, P.; Vucic, D.; Jöckel, M.: Basics of linear flow splitting, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 183, Issues 2–3, 23 March 2007, Pages 249–255, Ireland
- [2] Chahadi, Y.; Wäldele, M.; Birkhofer, H.: Algorithm-based transformation of customer requirements into product properties, *Proceeding International Conference on Research into Design, ICoRD '09*
- [3] Birkhofer, H.; Fügenschuh, A.; Günther, U.; Junglas, D.; Martin, A.; Sauer, T.; Ulbrich, S.; Wäldele, M.; Walter, S.: Topology- and shape-optimization of branched sheet metal products, *Operations Research Proceedings*, editor H. Haasis, H. Kopfer, J. Schönberger, Seite 327–336, 2006
- [4] Fügenschuh, A.; Fügenschuh, M.: Integer Linear Programming Models for Topology Optimization in Sheet Metal Design, *Mathematical Methods of Operations Research*, 68(2), Seite 313–331, 2008
- [5] Ulbrich, M.; Ulbrich, S.: Primal-Dual Interior-Point Methods for PDE-Constrained Optimization, *Math. Program.* 117, pp. 435–485, 2009
- [6] Hess, W.: *Geometry Optimization with PDE Constraints and Applications to the Design of Branched Sheet Metal Products*, Verlag Dr. Hut, 2010
- [7] Günther, U.: *Integral Sheet Metal Design by Discrete Optimization*, Verlag Dr. Hut, 2010
- [8] Groche, P.; Vucic, D.; Schmitt, W.; Ludwig, C.: Herstellung multifunktionaler Blechprofile, *wt Werkstattstechnik online Jahrgang 99 (2009) H. 10*; pp. 712–720, 2009
- [9] Vucic, D.: *Methoden zum Herstellen und Weiterarbeiten von Spaltprofilen*, Shaker-Verlag, Aachen, 2010
- [10] Müller, C.; Bohn, T.; Bruder, E.; Bruder, E.; Landersheim, V.; el Dsoki, C.; Groche, P.; Veleva, D.: „Severe plastic deformation by linear flow splitting“, *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, 38, No. 10, 2007
- [11] Ertugrul, M.; Groche, P.: Hydroforming of Laser Welded Sheet Stringers. In: *Key Engineering Materials, Sheet Metal 2009*, Vols. 410–411. Trans Tech Publications, Switzerland, 2009, pp. 69–76



**Abbildung 4**  
Mechanische  
Eigenschaften  
spaltprofilierter  
Bauteile.



**Abbildung 5**  
Tiefziehen  
verzweigter Bleche  
zu mehrfach  
gekrümmten  
Flächentragwerken.



fahren (Abbildung 3): Hierbei wird Blechband vom Coil abgehaspelt und der Spaltprofilereinheit zugeführt. Diese besteht aus 10 sequentiell angeordneten Walzgerüsten, innerhalb derer durch jeweils vertikal angeordnete Hilfswalzen und diametral zum Blech liegende Spaltwalzen ein hydrostatischer Druckspannungszustand in der Umformzone induziert wird. Aufgrund des ansteigenden Formänderungsvermögens wird der Bruchumformgrad des Blechwerkstoffes erhöht, sodass sich Verzweigungen ausbilden. Die Spaltwalzen werden bei abnehmender Hilfswalzenbreite in jeder Stufe sukzessive um die inkrementelle Stichtiefe in Blechmittenrichtung zugestellt, sodass sich die endgültige Flanschlänge in Abhängigkeit der Spaltprofilier-Stufenanzahl einstellt. Nach einer Zerspanung der Flanschenenden zur Einstellung der zum Laserschweißen notwendigen Bauteiltoleran-



**Peter Groche** leitet seit 1999 als Professor das Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt. Er ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs 666.



**Stefan Ulbrich** ist Professor für Nichtlineare Optimierung und leitet seit 2004 die gleichnamige Arbeitsgruppe im Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt. Er ist stellvertretender Sprecher des Sonderforschungsbereichs 666.



**Wolfram Schmitt** ist seit 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen. Er ist Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 666.

zen erfolgt die walzprofilertechnische Einformung des spaltprofilierten Halbzeugs. Walzprofilieren ist ein kontinuierliches Biegeverfahren mit drehender Werkzeugbewegung, bei dem die Profilendgeometrie durch definiertes Biegen um einen definierten Biegewinkel in mehreren Stufen erreicht wird. Bedingt durch die erhöhte Steifigkeit der Bandkante verzweigter Halbzeuge ist der Profilierprozess nicht mit dem Walzprofilieren ebener Bleche zu vergleichen.

Zum einen ergeben sich ab bestimmten kritischen Biegewinkeln Hinterschneidungen, welche sich in einer geänderten Prozess- und Werkzeugauslegung niederschlagen. Andererseits verschieben sich durch die geänderte verzweigte Gestalt der ursprünglich ebenen Bandkante die Grenzen der Prozessauslegung, welche im Wesentlichen durch den Betrag der Bandkantendehnung bei gegebenen Biegewinkeln bestimmt werden [8, 9]. Mittels eines mitfahrenden Zerspanmoduls zur Hochgeschwindigkeits-Blechzerspannung ist es nachfolgend möglich, im kontinuierlichen Fertigungsbetrieb der Anlage diskontinuierliche Formelemente wie Löcher, Bohrungen und Nuten in die Profile einzubringen. Das Schließen der Profile erfolgt mittels Laserschweißen. Der rekonfigurierbare Aufbau der Anlage ermöglicht aufgrund der variablen Anordnung der Einzelprozesse eine hohe Produktvariabilität.

### Transfer und Anwendung

Integral verzweigte Ein- und Mehrkammerprofile verfügen über hohes Innovationspotential, welches in den Bereichen Bewertung und Anwendung erarbeitet wird: Durch den Umformprozess wird auf den der Spaltwalze zugewandten Verzweigungsflächen ein ultrafeinkörniges Gefüge (UFG) ausgebildet, welches sich durch hohe Härte bei weiterhin duktilem Deformationsverhalten auszeichnet. Hierdurch stellt die Kaltverfestigung des Werkstoffs trotz ansteigender Härte keine Limitierung der erreichbaren Stichtiefe dar (Abbildung 4) [10].

Die Nutzung freiliegender Flansche zur Profilanbindung macht zusätzliche Fertigungsoperationen zur Herstellung von Verbindungselementen überflüssig und ermöglicht so die Verkürzung herkömmlicher Prozessketten, wodurch sich erhebliche Einsparpotentiale ergeben.

Weiterhin ist es möglich, geschlossene Profilkammern einzubringen und somit Bauraum von Tragprofilen funktional zu nutzen.

Im Rahmen dreier Transferprojekte aus den Bereichen Fertigung und Bewertung werden die gewonnenen Erkenntnisse in die industrielle Praxis überführt. Wissenschaftliche Ergebnisse werden hierbei an industriellen Anforderungen reflektiert, um weitere wissenschaftliche Tätigkeiten mit dem Ziel einer industriellen Anwendung der integralen Blechbauweisen ableiten und fokussieren zu können.

Als ein weiterer wissenschaftlicher Schwerpunkt steht seit Beginn der zweiten Förderperiode die Herstellung flächiger Strukturen aus verzweigten Blechen im Fokus des SFB. Das Tiefziehen kontinuierlich spaltgebogener Bleche (mit Verzweigungen in der Fläche) mit Hilfe von Wirkmedien eröffnet die Möglichkeit, mehrfach gekrümmte Flächentragwerke mit parallel verlaufenden Stützrippen zu fertigen [11].

Durch die Prozesskette bestehend aus Spaltbiegetechnologie mit nachgelagertem wirkmedienbasierten Tiefziehen lässt sich das herstellbare Spektrum von leichtbauoptimierten Flächentragwerken deutlich erweitern (Abbildung 5). Die Vorteile der Tiefziehverfahren lassen sich auf Leichtbaustrukturen übertragen und ermöglichen somit neben einer technologischen Verbesserung von Tragwerks- und Crashelementen auch die wirtschaftliche Fertigung solcher Bauteile.

Detaillierte Übersichten, genaue Inhalte der Teilprojekte und aktuelle Informationen über den SFB 666 sind zugänglich über die Website: [www.sfb666.de](http://www.sfb666.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](mailto:groche@ptu.tu-darmstadt.de)

### Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU)

Dipl.-Ing. Wolfram Schmitt  
Tel. 06151/16-6473  
E-Mail: [schmitt@ptu.tu-darmstadt.de](mailto:schmitt@ptu.tu-darmstadt.de)  
[www.ptu.tu-darmstadt.de](http://www.ptu.tu-darmstadt.de)

### Nichtlineare Optimierung

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

# Einsatz von Robotern in der spanenden Fertigung

Zur fräsenden Bearbeitung von komplexen Bauteilen mit Genauigkeitsanforderungen von weniger als 0,1 mm werden in der industriellen Praxis fünfachsige Werkzeugmaschinen eingesetzt. Industrieroboter sind zwar weitaus kostengünstiger, erzielen jedoch aufgrund ihrer Nachgiebigkeit eine geringere Bearbeitungsgenauigkeit. Mit Hilfe eines mathematischen Modells, welches die statischen und dynamischen Wechselwirkungen zwischen Roboterstruktur und Fräsprozess realitätsnah abbildet, können Abdrängungseffekte simuliert und optimal korrigiert werden. Die Herausforderung: Die hohe Genauigkeit kann nur erzielt werden, wenn Modellparameter stets präzise bekannt sind.

## ► Achieving higher accuracy of robots in milling applications

*For milling of complex work pieces with required accuracies of less than 0.1 mm five-axis machine tools are used in industrial practice. Industrial robots are by far more cost-efficient but they are achieving less machining accuracy due to their elastic resilience. Deviations can be simulated and corrected with a mathematical model, that reproduces static and dynamic interactions of robot and milling process. The challenge: High accuracy can only be achieved, if model parameters are known precisely at any time.*

**Eberhard Abele, Jörg Bauer, Martin Friedmann, Matthias Pischon, Christian Reinl, Oskar von Stryk** • Das traditionelle Anwendungsgebiet von Industrierobotern weitet sich im Zuge der Fertigungsautomatisierung stetig aus. Ausgehend von klassischen Handhabungsaufgaben finden Roboter bereits weiten Einsatz in verschiedenen Gebieten wie Schweiß- oder Montagetechnik. Diese Aufgaben haben gemein, dass keine hohen Kräfte auf den Endeffektor des Roboters einwirken und lediglich eine moderate Bearbeitungsgenauigkeit erforderlich ist. Für Aufgaben mit höheren Prozess- und Bearbeitungskräften ist die Genauigkeit allerdings deutlich geringer, was durch eine erhöhte Abdrängung des Endeffektors verursacht wird und sich in einer schlechten Positionier- und Wiederholungsgenauigkeit niederschlägt.

Fräsen mit Industrierobotern: Bearbeitungskräfte und hohe Präzisionsanforderungen im scheinbaren Widerspruch.

Im Fall der Fräsbearbeitung bestätigen die aktuellen Zahlen des Fachverbandes VDMA einen weiteren Anstieg von Neuinstallationen von Robotern in den vergangenen Jahren, die speziell für Zerspanaufgaben eingesetzt werden. Dies liegt nicht zuletzt an den deutlich niedrigeren In-

vestitionskosten und der höheren Flexibilität eines Roboters im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine. Bisherige Einsatzschwerpunkte sind beispielsweise das Prototyping, das Entgraten von Gussbauteilen sowie das Vorbearbeiten von Bauteilen mittlerer Genauigkeit. Gründe hierfür sind, dass die dabei zerspannten Werkstoffe lediglich kleine bis mittlere Kräfte hervorrufen und somit der dazu erforderliche Toleranzbereich von 0,2 mm bis 0,5 mm eingehalten werden kann. Die Bearbeitung von Materialien höherer Festigkeit (z. B. Aluminium) ist im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine bislang nur mit erheblich geringerer Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit erreichbar.

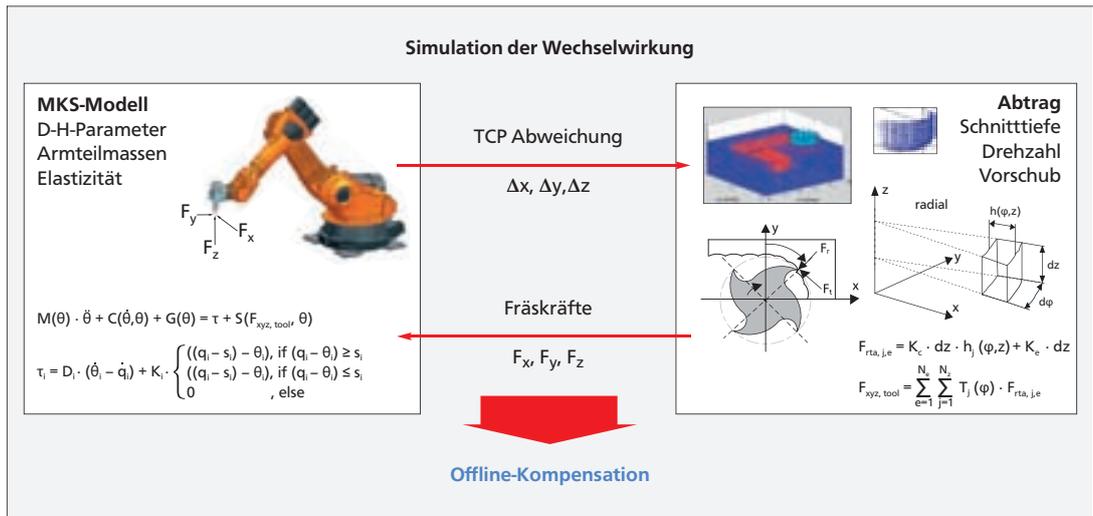
Die durch den Zerspanprozess hervorgerufenen Kräfte verursachen eine Abdrängung der Werkzeugschneide („Tool Center Point“ – TCP) von der Soll-Bahn sowie eine niederfrequente Schwingung des Roboters. Diese unerwünschten statischen und dynamischen Abweichungen sind an einem Roboter wesentlich stärker ausgeprägt als bei einer Fräsmaschine. Die insgesamt geringere Steifigkeit ist großteils auf die verbauten Getriebe und die insgesamt schlankere Roboterstruktur zurückzuführen. Darüber hinaus variieren die Steifigkeiten im Arbeitsraum sehr stark.

Ziel aktueller Forschung ist es daher, die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Fräsbahn wesentlich zu verringern. Konstruktive oder mechatronische Weiterentwicklungen der Roboterkomponenten zur Erhöhung der Steifigkeit erhöhen dabei jedoch die Kosten des Industrieroboters wesentlich. Die Fachgebiete Simulation, Systemoptimierung und Robotik (Fachbereich Informatik) und das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (Fachbereich Maschinenbau) der TU Darmstadt arbeiten deshalb gemeinsam an einer modellbasierten Kompensationsmethode, die

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

**Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen**  
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Tel. 06151/16-2156  
E-Mail: [info@ptw.tu-darmstadt.de](mailto:info@ptw.tu-darmstadt.de)  
[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)

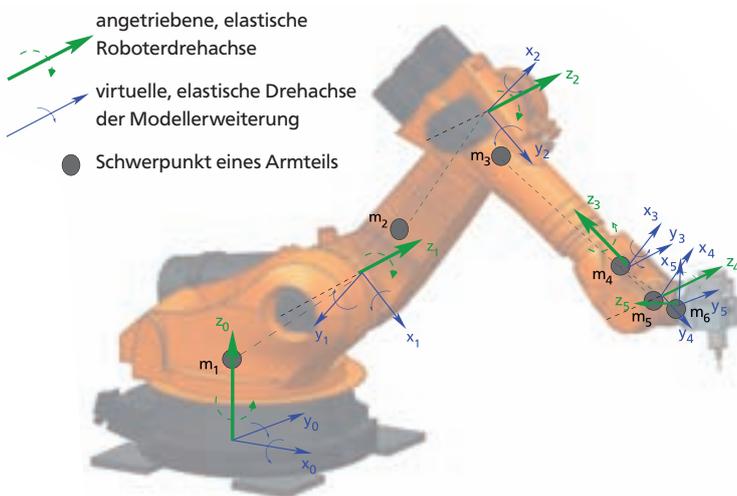




**Abbildung 1**  
Konzept der modellbasierten Bahnkorrektur.

es erlaubt, kostengünstige Standard-Industrieroboter für diese bisher Werkzeugmaschinen vorbehaltenen Aufgaben einzusetzen. Statische Abweichungen lassen sich bereits im Vorfeld einer Bearbeitung durch Simulation berechnen und über eine Modifikation des Fräsprogramms signifikant reduzieren. Ein Umbau oder zusätzliche Sensorik sind hinsichtlich dieser Effekte nicht zwingend erforderlich. Die Vorhersage der Schwingungen des Roboters und damit des dynamischen

**Abbildung 2**  
Erweiterte Robotermodellierung mit Elastizitäten an virtuellen Drehachsen.



Systemverhaltens des Gesamtsystems von Roboter und Fräsprozess ist wesentlich aufwendiger und erfordert eine detaillierte Modellierung und Parametrisierung. Hinsichtlich der praktischen Einsetzbarkeit und Genauigkeit der Kompensation ist die Integration zusätzlicher Sensoren am TCP zum Erfassen der Schwingungen empfehlenswert. Die Einbindung der Sensorik in die Steuerung lässt prinzipiell eine Onlinekompensation der niederfrequenten Schwingung zu. Eine teilweise Modifikation der Robotersteuerung wäre in diesem Fall jedoch notwendig.

Eine genaue Parametrisierung von Simulationsmodellen verlangt allerdings üblicherweise einen hohen experimentellen Aufwand zur Modellparameterbestimmung. Ziel der aktuellen Arbeiten ist die Entwicklung und Anwendung von Methoden, welche die Parameterbestimmung weitestgehend automatisiert mit einer möglichst geringen Zahl an Experimenten und Messbewegungen durchführen.

**Modellierung der Wechselwirkungen von Prozess und Struktur**

Die Grundlagen zur statischen Offlinekompensation bilden ein Mehrkörpersimulationsmodell (MKS-Modell) des Roboters sowie ein Fräskraftmodell. Bei genauerer Analyse zeigt sich eine starke Wechselwirkung zwischen der Struktur des Roboters und dem Fräsprozess. Durch die Fräskräfte

wird der TCP der nachgiebigen Roboterstruktur abgedrängt, womit sich eine neue Schnittgriffssituation einstellt. Diese ruft wiederum eine Fräskraftänderung hervor (vgl. Abbildung 1 oben). Infolgedessen wird ein gekoppeltes Gesamtmodell benötigt. In der Vergangenheit wurden bereits vielfach Modelle von Industrierobotern als starre Mehrkörpersysteme aus Armteilen und drehbaren Achsgelenken aufgebaut, wobei Nachgiebigkeiten lediglich in rotatorischer Achsgelenkrichtung berücksichtigt wurden. Experimentelle Untersuchungen am PTW zeigten jedoch, dass Roboter ebenfalls Nachgiebigkeiten senkrecht zur Achsdrehrichtung aufweisen. Die Nachgiebigkeiten in den Gelenkachsen werden in erster Linie durch Elastizitäten in den Getrieben verursacht. Für die korrekte Beschreibung des dynamischen Verhaltens werden deshalb zusätzlich virtuelle Drehachsen orthogonal zur realen Drehachse eingefügt und Kippteifigkeiten zugeordnet (vgl. nebenstehende Infobox, Abbildung 2).

Elastizitäts- und Dämpfungsparameter im Robotermodell lassen sich zunächst experimentell durch Steifigkeitsmessungen sowie eine Modalanalyse

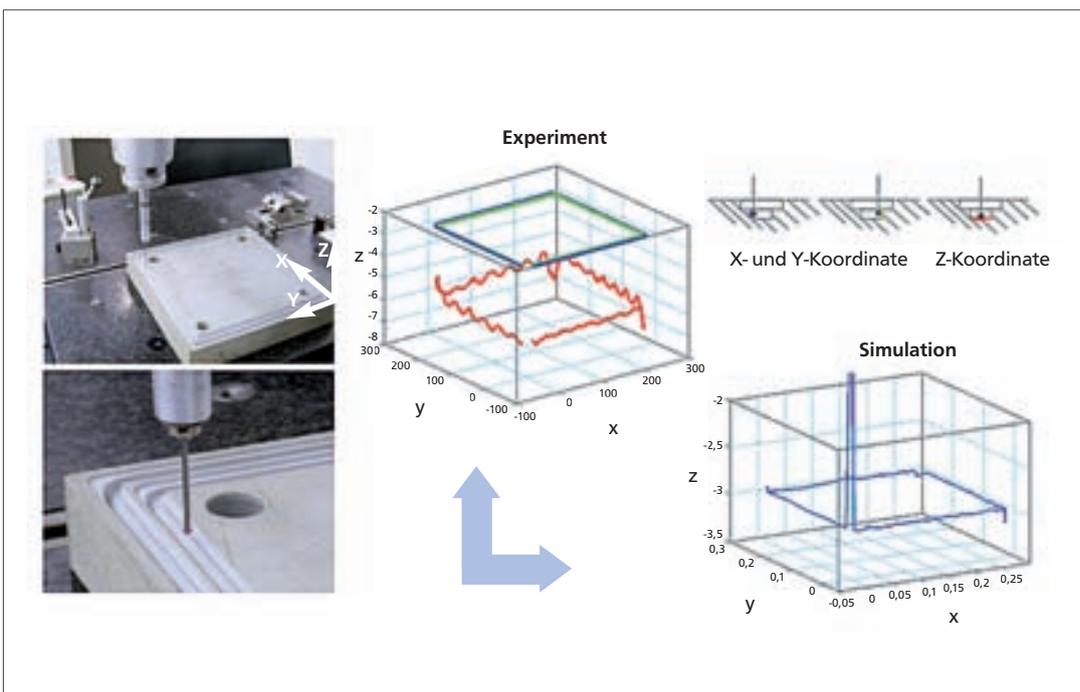
**Dynamikmodellierung Industrieroboter**

Die Dynamik des Roboters lässt sich durch Gleichungen beschreiben.

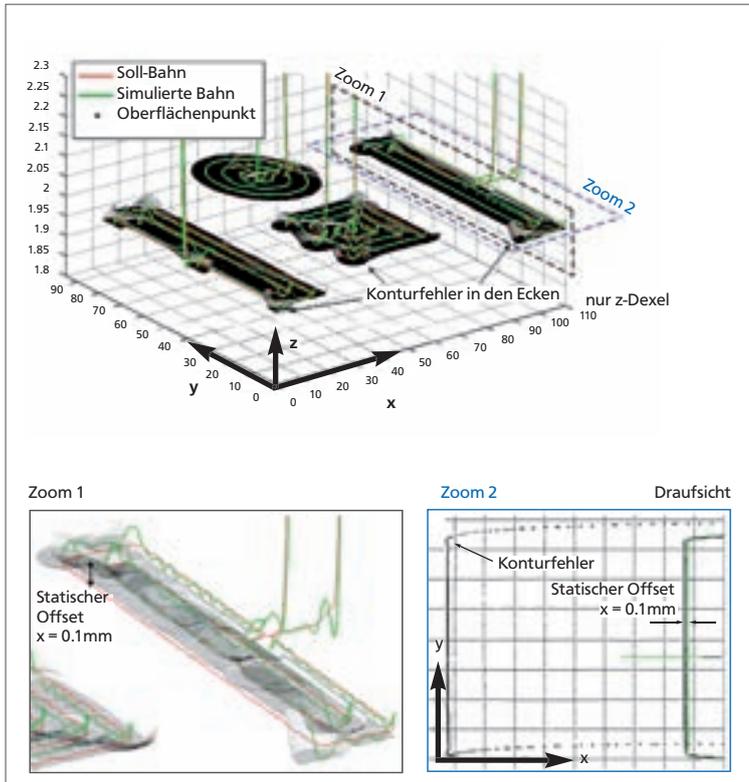
$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = M_G + S(F_{xyz}, q)$$

$$K \cdot (q_{soll} - q) + D(\dot{q}_{soll}, \dot{q}) = M_G$$

Dabei werden die abtriebsseitigen Gelenkpositionen  $q$  und deren Ableitungen in Relation zu den dort wirkenden Drehmomenten  $M_G$  und den in die Antriebe projizierten Fräskräften  $F_{xyz}$  gesetzt. Obige Gleichung wird nicht explizit aufgestellt. Stattdessen wird der Roboter als eine Kette aus Gelenken und Starrkörpern beschrieben und das Ergebnis der Gleichung rekursiv durch Iterieren über diese Kette berechnet. Dabei wird ein flexibler Modellierungsansatz verwendet, der es gestattet, an beliebigen Stellen in der Kette Gelenke zur Beschreibung von Elastizitäten zu platzieren. Die Modellierung der Antriebe erfolgt durch Ankoppeln der Antriebsstellungen  $q_{soll}$  über ein Feder-Dämpfer Modell, dass auch Spiel in den Getrieben berücksichtigt.



**Abbildung 3**  
Validierung des Strukturmodells.



**Modell der Fräskräfte**

Die resultierenden Fräskräfte hängen stark von den technologischen Parametern wie z. B. Vorschub und Drehzahl des Werkzeugs sowie der Schnitttiefe ab. Ausgehend davon kann ein Modell abgeleitet werden. Innerhalb des Projekts wurde das Modell nach Altintas verwendet, wonach gilt  $F_{rt} = K_c a_p h + K_e a_p$ . Dieses mechanistische Fräskraftgesetz setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem Schnittkraftanteil und dem Reibkraftanteil. Die Schnittkraft besteht aus dem Vektor der Schnittkraftkoeffizienten  $K_c = [K_{ct}, K_{cr}]$  in tangentialer ( $K_{ct}$ ) und radialer Richtung ( $K_{cr}$ ), der axialen Zustelltiefe  $a_p$  und der Spandicke  $h$ . Der Reibkraftanteil enthält den Reibkraftkoeffizientenvektor  $K_e = [K_{er}, K_{et}]$  sowie die axiale Zustellung  $a_p$ .

im relevanten Arbeitsraum in guter Näherung bestimmen.

Eine weitere Validierung des Strukturmodells erfolgt durch einen Fräsversuch in weichem Material, so dass die Fräskräfte gering sind und vernachlässigt werden können. Die zu erwartende Trajektorie umfasst somit lediglich die Einflüsse der Armträge sowie Steifigkeiten und Dämpfungen der Getriebe. Durch das nachträgliche Vermessen der gefrästen Bahn am Werkstück werden die Abweichungen des TCP von der programmierten Bahn deutlich. Die Auswertung zeigt ein Absenken/Anheben insbesondere in den Ecken einer Fräsbahn sowie ein Ausschwingen nach einem Richtungswechsel des TCP (Abbildung 3).

Mit Hilfe des Fräskraftmodells kann unter Berücksichtigung der Technologieparameter der Verlauf der Prozesskräfte am TCP berechnet werden. Grundlage ist jeweils die Beschreibung der Fräskraft an einem Fräserzahn in radialer und tangentialer Richtung (vgl. Infobox auf dieser Seite und Abbildung 1).

Eine Validierung des Fräskraftmodells erfolgt zunächst durch Versuche an einer Werkzeugmaschine.

**Abbildung 4**  
Simulation der Abdrängungseffekte.

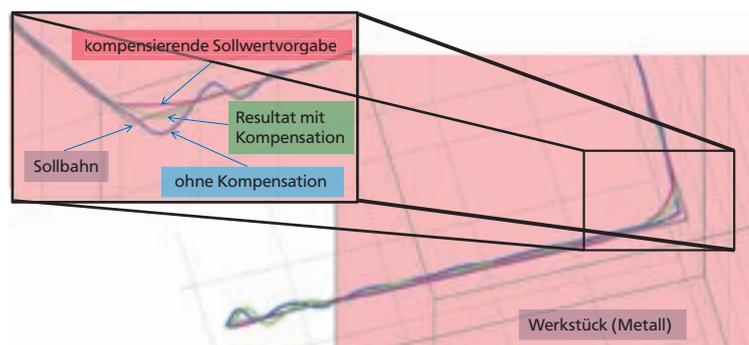
Der Grund hierfür ist die sehr viel steifere Struktur des Maschinensystems; dies lässt eine geringere Beeinflussung durch Prozesskräfte erwarten. Nach Anpassung der Fräskraftparameter konnte auch hier eine gute Übereinstimmung des Kraftmodells mit gemessenen Kräften erzielt werden.

**Abbildung 5**  
Resultat der Kompensationsstrategie.

**Modellbasierte Kompensation der Abdrängung**

Eine erste, effiziente Kompensationsstrategie mit dem Ziel korrigierende Sollwert-Vorgaben für die Robotersteuerung zu berechnen, so dass in Folge der Abdrängung (vgl. Abbildung 5) sich der gewünschte Fräsbahnverlauf einstellt, konnte bereits erfolgreich im Experiment erprobt werden.

Dabei wird zunächst die gewünschte Fräsbahn mit einem idealisierten Robotermodell, ohne Berücksichtigung von Elastizitäten, simuliert. Daraus re-



**Literatur**

J. Bauer, M. Friedmann, T. Hemker, M. Pischon, C. Reinl, E. Abele, O. von Stryk: Analysis of Industrial Robot Structure and Milling Process Interaction for Path Manipulation; In: Process Machine Interactions (B. Denkena, Hrsg.), Springer-Verlag 2011

sulziert ein zugehöriger idealer zeitlicher Verlauf von Gelenkstellungen und Fräskräften.

Mit Hilfe einer Inversdynamikberechnung lassen sich damit für ausgewählte Punkte entlang der Fräsbahn-Trajektorie entsprechende Drehmomente der Gelenke ermitteln. Unter der Annahme, dass die Kompensation der Abdrängung keine zusätzlichen Sollvorgaben für die Gelenkwinkelgeschwindigkeit erfordert, werden korrigierende Gelenkstellungen nun effizient als Lösung eines linearen Gleichungssystems gewonnen. Dabei gehen sowohl angetriebene als auch virtuelle Achsen des Robotermodells in die Strategie ein. Über die Roboterkinematik werden die kompensierenden Gelenkstellungen neu in Bahnpositionen umgerechnet, welche schließlich dem Roboterprogramm übergeben werden.

In der Simulation und im realen Experiment zeigt sich bereits bei diesem ersten Ansatz eine signifikante Verbesserung (vgl. Abbildung 5). Der Detaillierungsgrad von Fräskraft- und Robotermodell ermöglicht demnach bereits mit experimentell bestimmten Modellparametern und einer schlanken Kompensationsstrategie eine deutliche Erhöhung der Genauigkeit der resultierende Fräsbahn.

Eine effiziente objektorientierte Implementierung des Robotermodells, die sich der Techniken des automatischen Differenzierens bedient, erlaubt neben der Simulation der Roboterdynamik mit Nachgiebigkeiten auch eine genaue numerische Sensitivitätsanalyse. Der Einsatz einer rechnerischen Modellparameterbestimmung, welche eine minimale Abweichung von experimenteller Beobachtung und Simulationsergebnis garantiert, wird damit ermöglicht. Eine Genauigkeitsverbesserung des Modells kann somit automatisiert erfolgen, sofern entsprechende Messdaten der realen Robotertrajektorien vorliegen. So kann eine Kompensationsstrategie nicht nur auf Änderungen des physikalischen Roboterhaltens – etwa in Folge eines Temperatureinflusses – reagieren, sondern ist schließlich äußerst flexibel auf eine ganze Klasse von Industrierobotern ähnlicher Bauart übertragbar.

Auch an der Kompensationsstrategie wird weiter gearbeitet. Die Einbindung effizienter nichtlinearer Optimalsteuerungsroutinen verspricht hier die Erzeugung von Sollwertvorgaben nach spezifischen Optimalitätskriterien. Alle entwickelten

Komponenten haben jeweils für sich ihre Eignung bewiesen. Gelingt es, diese nun in einer robusten Gesamtmethodik zusammenzufassen, kann dem Anwender mittelfristig ein kostengünstiges und leistungsfähiges Werkzeug bereitgestellt werden, das bei einer minimalen Anzahl von Test- und Kalibrierungsläufen eine entscheidende Genauigkeitsverbesserung beim Fräsen ermöglicht. Zur Erschließung zahlreicher neuer Einsatzbereiche für Industrieroboter wäre damit ein entscheidender Schritt getan.



**Eberhard Abele** ist seit 2001 Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen im Fachbereich Maschinenbau.



**Jörg Bauer** (Fachgebiet PTW) arbeitet innerhalb der roboterbasierten Fräsbearbeitung schwerpunktmäßig an modell- und kameragestützten Offline-Bahnkorrekturverfahren.



**Martin Friedmann** (Fachgebiet SIM) arbeitet schwerpunktmäßig an der Modellierung und Simulation von Robotern und biomechanischen Systemen.



**Matthias Pischan** (Fachgebiet PTW) arbeitet innerhalb der roboterbasierten Fräsbearbeitung schwerpunktmäßig an Verfahren zur Entgratung von Querbohrungen sowie der modellbasierten Bahnkorrektur.



**Christian Reinl** (Fachgebiet SIM) arbeitet schwerpunktmäßig an diskretkontinuierlichen, optimalen Steuerungen mit Anwendungen für Industrieroboter und kooperative, mobile Systeme.



**Oskar von Stryk** ist Professor und leitet das Fachgebiet Simulation, Systemoptimierung und Robotik am Fachbereich Informatik. Die Robotik-Forschung wurde mehrfach international ausgezeichnet.

# Komplexe Oberflächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit

Die Benetzung von Oberflächen spielt bei einer Reihe von unterschiedlichen Alltagsphänomenen und technologischen Prozessen eine Rolle. Beispiele sind das Beschlagen von Spiegeln und Fensterscheiben oder die Beschichtung von Oberflächen. Flächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit herzustellen, z. B. durch Aufbringen einer Struktur, ist daher ein Ziel von weit reichender Bedeutung. In diesem Artikel werden neben elementaren Grundlagen der Benetzung Produktionstechnologien zur Herstellung entsprechender Strukturen und neuartige Anwendungsperspektiven für mikrostrukturierte Oberflächen vorgestellt.

## ► *Complex surfaces with tailor-made wettability*

*Wetting of surfaces plays a role for a number of phenomena in everyday life as well as for certain technological processes. Examples are the fogging of mirrors and window panes or the coating of surfaces. Therefore, the fabrication of surfaces with tailor-made wettability is of far-reaching importance. In this article, besides some fundamentals of wetting, production technologies for the fabrication of corresponding surfaces and novel application perspectives for microstructured surfaces are presented.*

**Eberhard Abele, Jakob Fischer, Steffen Hardt, Selin Manukyan, Ilia Roisman** • Oft existieren für vom Menschen entwickelte Technologien Vorbilder in der Natur, so im Fall der Lotuspflanze. Die Blattoberfläche dieser Pflanze ist mit feinen Strukturen bedeckt (Abbildung 1), die dafür sorgen, dass ein Wassertropfen in der Manier eines Fakirs auf den Erhebungen sitzt. Derartige Oberflächen sind extrem schlecht benetzbar, auch kleine Wassertropfen perlen von ihnen ab. Auf diese Weise schützt sich die Lotuspflanze vor Verschmutzungen.

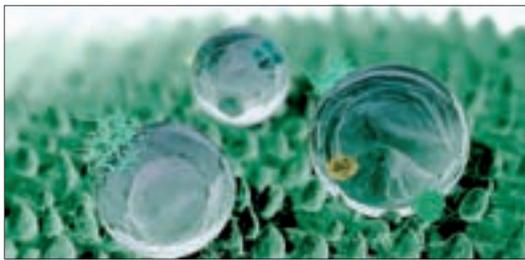
In den letzten Jahrzehnten hat man gelernt, diesen Effekt nachzubilden und technologische Oberflächen zu schaffen, die ähnliche Eigenschaften besitzen wie ein Lotusblatt. Aber nicht nur das: Durch eine maßgeschneiderte Strukturierung von Oberflächen gelingt es, die Natur zu übertreffen und superhydrophobe Oberflächen zu erzeugen, die Effekte zeigen, die in der Natur ohne Vorbild sind. Am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt beschäftigen wir uns unter anderem mit der Erforschung und Optimierung derartiger Oberflächen. Beispielsweise sollten es superhydrophobe Oberflächen ermöglichen, eine Flüssigkeit mit Hilfe einer Temperaturdifferenz zu pumpen. Das Pum-





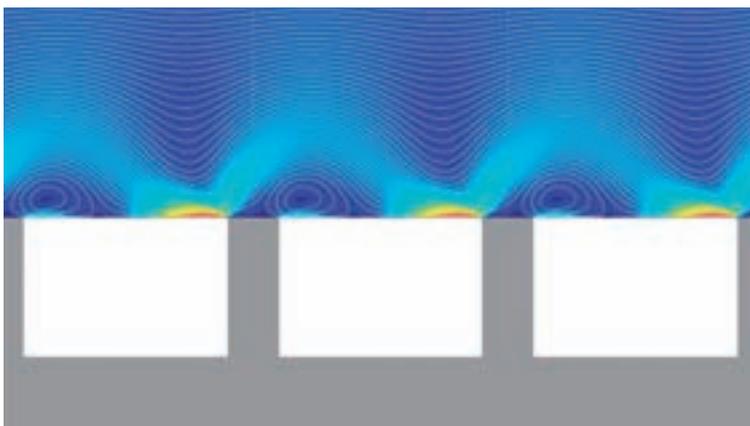
Moderne Mikroskopiesysteme sind unersetzbare Hilfsmittel bei der Erforschung des Flüssigkeitstransports an Oberflächen. Wird ein Fluoreszenzfarbstoff in die Flüssigkeit eingebracht, breitet sich dieser mit der Strömung aus und kann im Mikroskop detektiert werden.

**Abbildung 1**  
Strukturen auf der  
Oberfläche eines  
Lotusblatts.

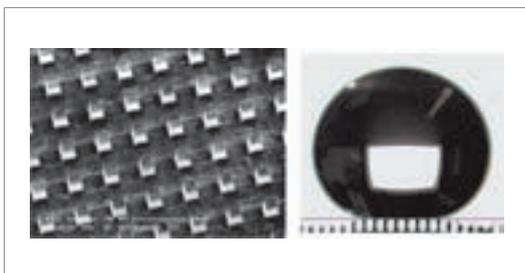


**Abbildung 2**  
Simulationsresultate  
zur thermokapillaren  
Strömung entlang  
superhydrophober  
Oberflächen. Die  
Oberflächenstruktur  
ist schematisch in  
grau dargestellt. Die  
Flüssigkeit dringt  
nicht in die  
Vertiefungen der  
Oberfläche ein.

pen durch eine Temperaturdifferenz hätte den Vorteil, dass entsprechende Pumpen extrem einfach aufgebaut wären, was insbesondere für miniaturisierte Systeme von Vorteil sein könnte. Abbildung 2 zeigt Simulationsresultate für eine Flüssigkeit auf einer superhydrophoben Oberfläche, entlang derer sich die Temperatur ändert. Durch die Temperaturänderung beginnt die Flüssigkeit entlang der Oberfläche zu strömen. Die Abbildung zeigt die berechneten Stromlinien in der Flüssigkeit, die nicht in die Vertiefungen der



**Abbildung 3**  
Durch Ultrapräzisionszerspanung  
erzeugte  
superhydrophobe  
Oberfläche (links)  
und Seitenansicht  
eines Wassertropfens auf  
einer derartigen  
Oberfläche (rechts).



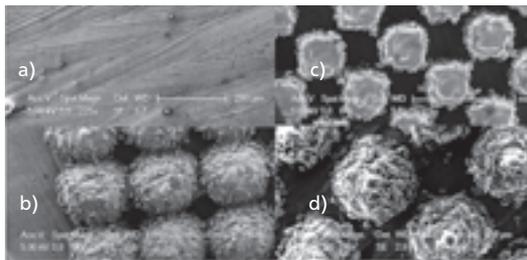
Oberfläche eindringt sowie als Farbskala den Beitrag der Flüssigkeitgeschwindigkeit.

Forschungsthemen wie dieses erfordern es, Oberflächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit herzustellen. Dies bedeutet, dass man die Größe und Geometrie der Oberflächenstrukturen möglichst frei bestimmen und im Hinblick auf bestimmte Anwendungen optimieren möchte. Entsprechende Strukturen werden am Mikro Prototyping Zentrum der TU Darmstadt mit Hilfe zweier unterschiedlicher Methoden hergestellt: dem Laser-Sinterverfahren und der Ultrapräzisionszerspanung.

#### **Laser-Sintern und Ultrapräzisionszerspanung zur Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen**

Der Prozess des Selektiven Laser-Schmelzens, auch als Laser-Sintern bezeichnet, basiert auf dem schichtweisen Aufbau von Bauteilen. Als Ausgangspunkt dient eine Schüttung kleiner Metallpartikel, d. h. ein Metallpulver. Zunächst werden aus einem Computermodell des Bauteils die zu belichtenden Bereiche in dem Pulverbett berechnet. Unter Verwendung einer Laserstrahlungsquelle werden dann diese Elemente in dem Pulver aufgeschmolzen. Nach der Erstarrung des aufgeschmolzenen Materials wird eine neue Schicht des Bauteilwerkstoffes in Pulverform durch einen Rakelmechanismus aufgebracht und die neue Materialschicht wieder aufgeschmolzen. Die Schichtstärken bewegen sich dabei im Bereich von  $20\ \mu\text{m}$  oder  $40\ \mu\text{m}$ . Der beschriebene Vorgang wiederholt sich so lange, bis das komplette Werkstück generiert wurde. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau können hochkomplexe Bauteilgeometrien direkt aus den CAD-Daten erstellt werden. In gewissen Prozessgrenzen sind hierdurch Strukturen realisierbar, die bislang durch keinen alternativen Prozess gefertigt werden können.

Ein etablierter Fertigungsprozess für mikrostrukturierte Bauteile ist heutzutage die Ultrapräzisionszerspanung. Die Zerspanung der Werkstoffe wird hierbei unter Verwendung von Mikrofräsern und -bohrern mit Durchmessern von z. T. nur  $20\ \mu\text{m}$  erreicht. Bedingt durch den definierten Materialabtrag können komplexe Oberflächenstrukturen direkt aus einem Computermodell des Werkstücks präzise gefertigt werden. Neben Metallen können auch Kunststoffe bearbeitet werden. Gegenüber



**Abbildung 4**  
Unterschiedliche, durch Laser-Sintern erzeugte Metalloberflächen.  
a) unstrukturierte Oberfläche  
b) halb-kugelförmige  
c) würfelförmige  
d) kegelförmige Strukturen.

dem Laser-Sintern bringt die Ultrapräzisionszersetzung eine Reihe von Einschränkungen bei der Herstellung dreidimensionaler Strukturen mit sich. Ein Vorteil der spanenden Bearbeitung im Vergleich zum Lasersintern besteht jedoch in den höheren Oberflächengütern. So ist jedes der beiden Verfahren mit spezifischen Vor- und Nachteilen verbunden.

Nach der Erzeugung von Oberflächenstrukturen besteht die Möglichkeit, diese im Anschluss einer dünnen Schicht zu versehen, um eine extrem wasserabweisende Wirkung zu erzielen. Dafür eignen sich z. B. dünne Schichten aus teflonartigen Poly-

meren. Schon wenige Nanometer dicke Lagen dieser Polymere genügen in der Regel, um der Oberfläche superhydrophobe Eigenschaften zu verleihen.

#### Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur und Benetzbarkeit

Abbildung 3 zeigt eine der durch Ultrapräzisionszersetzung erzeugten Oberflächen. Die in einem regelmäßigen Raster angeordneten Strukturen haben eine quadratische Querschnittsfläche von etwa  $50 \times 50 \mu\text{m}$  und sind knapp  $100 \mu\text{m}$  hoch. Das Aufbringen einer dünnen wasserabweisenden

—ANZEIGE

**Fachgebiet Nano- und Mikrofluidik,  
Center of Smart Interfaces**  
Steffen Hardt  
Tel. 06151/16-2581  
E-Mail: [hardt@csi.tu-darmstadt.de](mailto:hardt@csi.tu-darmstadt.de)  
[www.csi.tu-darmstadt.de/institute/nmf/index.en.jsp](http://www.csi.tu-darmstadt.de/institute/nmf/index.en.jsp)

**Center of Smart Interfaces**  
Selin Manukyan  
Tel. 06151/16-6606  
E-Mail: [manukyan@csi.tu-darmstadt.de](mailto:manukyan@csi.tu-darmstadt.de)  
[www.csi.tu-darmstadt.de/staff/mitarbeiterdetails\\_19968.en.jsp](http://www.csi.tu-darmstadt.de/staff/mitarbeiterdetails_19968.en.jsp)

**Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik**  
Ilia Roisman  
Tel. 06151/16-3929  
E-Mail: [roisman@sla.tu-darmstadt.de](mailto:roisman@sla.tu-darmstadt.de)  
[www.sla.tu-darmstadt.de/sla/index.de.jsp](http://www.sla.tu-darmstadt.de/sla/index.de.jsp)

**Institut für Produktionsmanagement,  
Technologie und Werkzeugmaschinen**  
Eberhard Abele  
Tel. 06151/16-2156  
E-Mail: [abele@ptw.tu-darmstadt.de](mailto:abele@ptw.tu-darmstadt.de)

Jakob Fischer  
Tel. 06151/16-6616  
E-Mail: [fischer@ptw.tu-darmstadt.de](mailto:fischer@ptw.tu-darmstadt.de)  
[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)



**WACHENDORFF**  
Elektronik GmbH & Co. KG



## Starten Sie mit uns in eine gemeinsame Zukunft!

**Wir bieten Ihnen  
den passenden Einstieg:**

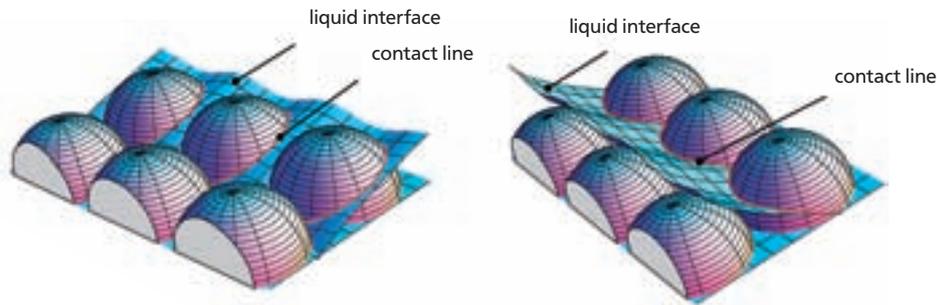
- Werkstudententätigkeit
- Praktika
- Bachelor-/Master-Thesis
- Direkteinstieg

**WACHENDORFF Elektronik GmbH & Co. KG**

Personalabteilung  
Industriestraße 7  
65366 Geisenheim

Martina Wachendorff  
Telefon 06722 9965-22  
E-mail [mw@wachendorff.de](mailto:mw@wachendorff.de)

wachendorff-elektronik.de



**Abbildung 5**  
Mathematische Modellierung der Benetzbarkeit von halbkugelförmigen Strukturen. Der scheinbare Kontaktwinkel hängt von der Position der Kontaktlinien ab.

Schicht auf derartig strukturierte Aluminiumoberflächen verleiht diesen superhydrophobe Eigenschaften. Der rechte Teil der Abbildung zeigt einen etwa zwei Millimeter kleinen Wassertropfen auf einer auf diese Weise erzeugten Oberfläche. Man erkennt deutlich, dass der Wassertropfen nicht in die Vertiefungen der Oberfläche eindringt. Wenn die Fläche auch nur ein wenig gegenüber der Horizontalen geneigt wird, rollt der Tropfen sofort ab, ähnlich wie auf einem Blatt der Lotuspflanze. Um die Benetzbarkeit einer Oberfläche zu quantifizieren, führt man den sogenannten Kontaktwinkel

ein. Dies ist der Winkel, den die Grenzfläche zwischen der Flüssigkeit und der umgebenden Luft mit der Oberfläche bildet. Ist eine Oberfläche vollständig benetzbar, bildet die Flüssigkeit auf ihr einen Film und der Kontaktwinkel beträgt null. Als grobe Regel gilt, dass sich der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer strukturierten Oberfläche vergrößert, wenn er auf der entsprechenden glatten Oberfläche mehr als  $90^\circ$  beträgt. Umgekehrt verkleinert sich der Kontaktwinkel durch Strukturierung der Oberfläche bei einem Ausgangswinkel von kleiner als  $90^\circ$ .

Der genaue Wert, den der Kontaktwinkel annimmt, hängt von der Form der Oberflächenstrukturen ab. In Abbildung 4 sind mit dem Laser-Sinterverfahren erzeugte unterschiedliche Oberflächenstrukturen dargestellt. Die sehr rauen Seitenwände der Strukturen sind dabei erwünscht und führen zu einer Vergrößerung des Kontaktwinkels. Es zeigt sich, dass der Kontaktwinkel von Wasser auf den kegelförmigen Strukturen größer ist als auf den halbkugel- oder würfelförmigen. Die Spitzen der kegelförmigen Erhebungen minimieren die Kontaktfläche mit der Flüssigkeit und verhindern, dass diese den Boden der strukturierten Oberfläche benetzt.

### Modellierung der Benetzung von komplexen Oberflächen

Um Oberflächen mit maßgeschneiderten Benetzungseigenschaften herzustellen ist es wichtig, die Physik der Benetzung zu verstehen und aus diesem Verständnis heraus spezifische Oberflächenstrukturen mit den gewünschten Benetzungseigenschaften zu entwickeln.

Viele Jahrzehnte lang verwendete man zu diesem Zweck die relativ einfachen Modelle von Wenzel (1936) und Cassie-Baxter (1944). Neuere Forschungsergebnisse zeigen allerdings deutlich, dass diese Modelle nicht universell sind und in der Tat die meisten Situationen nicht korrekt beschreiben. Der Grund dafür ist, dass der komplexen Form der Kontaktlinie zwischen Gas, Flüssigkeit und Festkörper nicht Rechnung getragen wird.



**Eberhard Abele** ist Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces.



**Jakob Fischer** ist Leiter des Mikro Prototyping Zentrums und Doktorand am PTW.



**Steffen Hardt** ist Leiter des Fachgebiets Nano- und Mikrofluidik am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt.



**Selin Manukyan** arbeitet als Doktorandin am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt. Ihr Schwerpunkt liegt in der Erforschung der statischen und dynamischen Benetzung von komplexen Flüssigkeiten auf strukturierten Oberflächen.



**Ilia Roisman** ist Privatdozent am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt.

In Abbildung 5 ist die Kontaktliniengeometrie für ein Substrat schematisch dargestellt, auf dem Halbkugeln in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind. Der Kontaktwinkel hängt von der Position der Kontaktlinie relativ zu den Halbkugeloberflächen ab. Dieser Effekt erklärt das Phänomen der Kontaktwinkelhysterese, d. h. die Tatsache, dass der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche oft keinen exakt definierten Wert besitzt, sondern beliebige Werte innerhalb eines relativ breiten Intervalls annehmen kann. Auf bestimmten Oberflächen beträgt die Breite dieses Intervalls 50° oder mehr. Die genaue

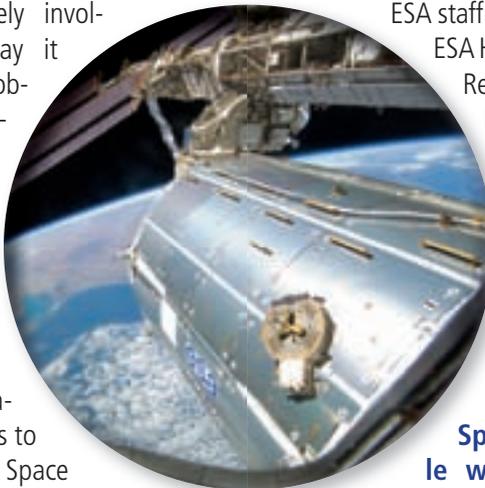
Form der Flüssigkeitsoberfläche auf einer strukturierten Oberfläche auch im Experiment zu untersuchen ist oft nicht einfach, da nur bei sehr feinen Oberflächenstrukturen vermieden werden kann, dass die Schwerkraft die Flüssigkeitsoberfläche signifikant deformiert. Solch feine Details können allerdings nicht immer leicht beobachtet werden. Abhilfe schafft hier die „Abschaltung“ der Schwerkraft, d. h. man führt Experimente im Weltraum durch. Die so gewonnenen Daten helfen den Forschern, mehr über die Benetzbarkeit von komplexen Oberflächen zu erfahren.

ANZEIGE



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

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



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

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

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

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

# Effiziente Energiewandlung als Optimierungs- und Skalierungsaufgabe

Nun sag', wie hast du's mit der Energieeffizienz? Obgleich wir alle rufen, „höchste Priorität“, bleibt die Antwort nach dem „Wie“ zumeist so vage wie die Antwort auf Gretchens Frage: „Umnebelnd Himmelsglut“. Könnten wir einen Mikroorganismus fragen, so bekommen wir die Antwort „das kümmert mich nicht“. In der Tat liegt der Propulsionswirkungsgrad bei nur etwa 1 % [10]. Der Mikroorganismus hat kein ökonomisches Problem, Energie ist für ihn unbeschränkt verfügbar. Er ist mit einem Cadillac Sedan aus den 1960er Jahren vergleichbar. Heute beantworten wir durch unsere Forschung die Frage nach dem Wie, indem das System im Fokus ist.

## ► What do you think of energy efficiency?

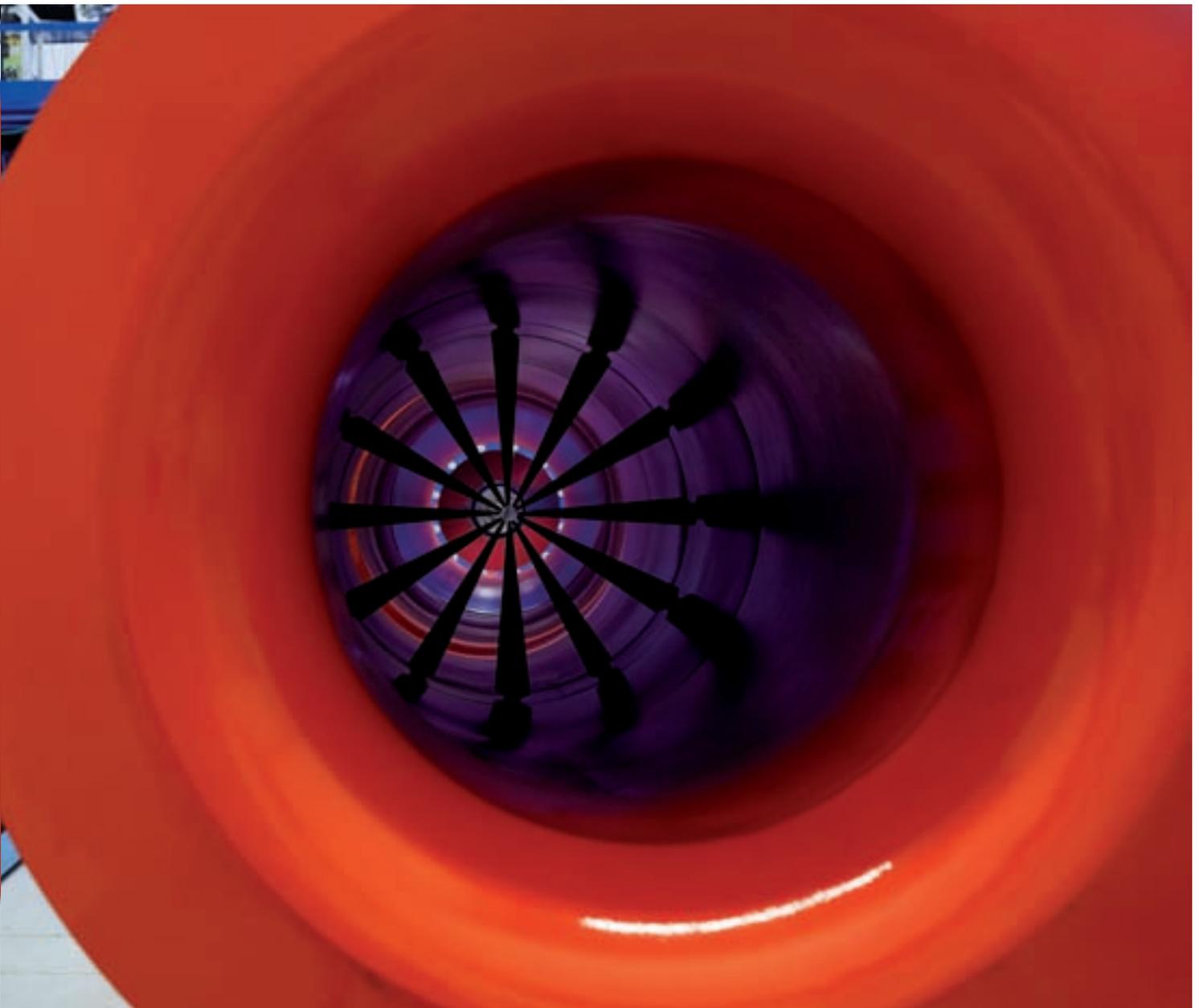
*„It's of first priority, of course“ we all answer. But the answer to the question „How do you reach the efficiency“ remains such vague like the answer to the Gretchen question: „Enshrouding heaven's glow“. If we could ask a micro-organism he (or she) would answer „I do not pay much attention to it“. Indeed the propulsion efficiency of the micro-organism is only about 1 % [10]. The organism has no economic restriction, since the chemical energy is unlimited for him. In fact it is like driving a Cadillac Sedan in the 60th. Today, our research gives the answer to the crucial question. We put the system in our focus.*

**Peter Pelz, Ulf Lorenz** • In der Technik und der gesellschaftlichen Diskussion gibt es immer wieder Begriffe, die unpräzise sind oder aus Marketinggründen irreführend eingesetzt werden. Solch ein Begriff ist „Energieeffizienz“. Versteht man den Weg zur Energieeffizienz als ein zweistufiges Verfahren, nämlich in erster Linie eine Optimierung des Systems und in zweiter Linie eine Skalierung zum Beispiel des Wirkungsgrades einzelner Module des Systems, so kann eine Diskussion, die heute alle Ingenieurbereiche betrifft, sachlich geführt werden.

Als Beispiel dient ein Thema, welches jedem vertraut ist, nämlich ein Wasserrad in einem fließenden Gewässer: Im Jahr 1846 schreibt der Begründer des wissenschaftlichen Maschinenbaus in Deutschland, Ferdinand Redtenbacher, im Vorwort seiner Monographie „Theorie und Bau der Wasserräder“ [1]: „Ein Werk über die Wasserräder mit horizontalen Achsen ist zwar im gegenwärtigen Augenblick keine zeitgemäße Erscheinung, denn diese Räder sind durch die rapide Verbreitung der Turbinen fast eine Antiquität geworden. Allein wenn auch ihre Bedeutung nicht mehr so gross ist, als sie es noch vor einigen Jahren



war, so sind und bleiben dieselben doch noch immer nützliche Kraftmaschinen, die durch die Turbinen wohl nie ganz verdrängt werden können.“ Heute, 165 Jahre nachdem Ferdinand Redtenbacher dies geschrieben hat, sind Wasserräder prak-



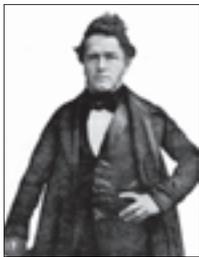
tisch vollständig verschwunden. Warum ist dies so? Wie weiter unten ausgeführt und in [6] gezeigt, sind bei gleicher Leistungsumsetzung der Materialbedarf und damit die Kosten für ein Wasserrad größer im Vergleich zu einer schnellläufigen Tur-

bine. Trotz alledem erleben Wasserräder heute eine Renaissance und werden für Kleinwasserkraftwerke  $< 0.1$  MW propagiert. Als Argument für Wasserräder wird allein deren hydraulischer Wirkungsgrad herangezogen.

Elemente eines Fluidarbeitsystems im Labor Fluidsystemtechnik: Luftführung mit Drossel.



**Abbildung 1**  
Skalieren von  
Antriebssystemen am  
Beispiel des Ruderns.



**Abbildung 2**  
Ferdinand  
Redtenbacher.

Über dieses Beispiel hinaus stellt sich die Frage, ob der Wirkungsgrad generell das Bewertungsmaß für Energieeffizienz ist? Um die Antwort vorwegzunehmen: Sie lautet „Nein“!

Die Wirkungsgradbetrachtung ist immer Teil einer **Skalierungsaufgabe** eines Moduls. Deutlich wichtiger und damit vorrangig ist die **Optimierungsaufgabe** des Systems. Diese entscheidet im Wesentlichen über die leistungsspezifischen Investitionskosten und damit über den Erfolg oder Misserfolg einer Technologie.

### Optimierung und Skalierung von Fluidsystemen

Im Folgenden werden die vier Fluidkraftsysteme Wind-, Wasser-, Wellenkraft und Energiegewinnung aus einem Druckspeicher im Kontext von Optimierung und Skalierung betrachtet. Die hier dargestellte Aufteilung zwischen Optimierung und Skalierung gilt für Fluidarbeitssysteme (Lüftungssysteme, Wasserversorgung, verfahrenstechnische Anlagen, ...) ganz entsprechend. Der Unterschied liegt in der funktionellen Aufgabe des Systems. Bei Fluidkraftsystemen steht ein Energieangebot am Anfang und es ist Aufgabe pro Zeiteinheit

möglichst viel der angebotenen Energie in mechanische Energie zu wandeln. Bei Fluidarbeitssystemen steht eine Nachfrage nach Luft, Wasser, ... pro Zeiteinheit im Vordergrund.

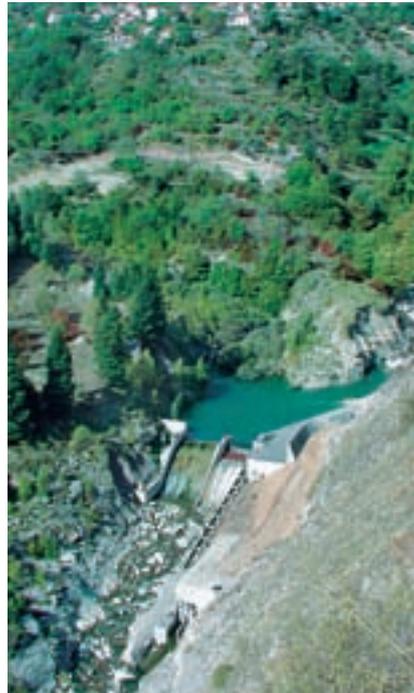
Um in den Abschnitt einzuführen, ist auch hier ein Blick in die Vergangenheit nützlich. Im Jahr 1920 veröffentlichte Albert Betz [2] eine noch heute grundlegende und weit genutzte Arbeit über Windräder, die die Optimierungsaufgabe exemplarisch darlegt.

### Die Optimierungsaufgabe

Heute sind Windräder alltägliche Erscheinungen. Man stellt sich leicht die Strömung durch die Rotorebene eines Windrades vor. Die Strömung ist durch zwei Extreme geprägt, bei denen die umgesetzte Leistung klein ist. Im ersten Fall stört das Windrad die Luftströmung zu sehr, im zweiten Fall so wenig, dass keine Druckänderung über das Windrad stattfindet und die Leistung als Produkt von Volumendurchsatz pro Zeiteinheit und Druckdifferenz verschwindet. In diesem Intervall findet sich das Optimum. Durch Ausnutzung grundlegender Axiome (Impulssatz, Kontinuität) konnte Betz in einer sehr einfachen und eleganten Rechnung zeigen, dass das Optimum dann erreicht ist, wenn das Windrad die Strömungsgeschwindigkeit gerade auf  $1/3$  der ungestörten Anströmgeschwindigkeit reduziert. Von der theoretisch verfügbaren aerodynamischen Leistung, von Betz als Fluss der kinetischen Energie durch die von den Rotorblättern aufgespannte Kreisscheibe der Fläche  $A$  mit  $P_{\text{avail}} = \rho/2 u_1^3 A$  (die Dichte der Luft ist mit  $\rho$  bezeichnet) definiert, kann hiervon selbst bei

Institut für Fluidsystemtechnik, Fachbereich Maschinenbau  
Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz  
Tel. 06151/16 2153  
E-Mail: peter.pelz@fst.tu-darmstadt.de  
[www.fst.tu-darmstadt.de](http://www.fst.tu-darmstadt.de)

Forschungsbereich Optimierung, Fachbereich Mathematik  
PD Dr. rer. nat. Ulf Lorenz  
E-Mail: lorenz@mathematik.tu-darmstadt.de  
[www3.mathematik.tu-darmstadt.de/index.php?id=537](http://www3.mathematik.tu-darmstadt.de/index.php?id=537)



Abbildungen 3 a, b  
Windturbine und  
Wasserturbine.

Abbildung 4  
Leistungsziffer  
für ein  
Windkraftsystem.

Abbildung 5  
Leistungsziffer  
für ein  
Wasserkraftsystem.

verlustfreier Strömung (Wirkungsgrad  $\eta$  gleich Eins) nur der Anteil  $16/27 = 0.59$  pro Zeiteinheit in mechanische Energie gewandelt werden. Die verbleibenden 41 % sind als kinetische Energie im Nachlauf des Windrades enthalten.

Das Verhältnis von abgeführter mechanischer Leistung zur verfügbaren Leistung, Leistungsziffer oder Erntefaktor  $C_p$  genannt, ist in Abbildung 4 für die Windturbine über der einen unabhängigen Veränderlichen  $u_+ = u_2/u_1$  aufgetragen. In dieser Darstellung ist die **Optimierungsaufgabe** für das System Windkraft selbsterklärend und bei bekannter Funktion  $C_p(u_+)$  und dem aerodynamischen Wirkungsgrad ohne Probleme durchführbar. Das Modul Windturbine wird ergänzt durch das mechanische und hydrodynamische Getriebe und dem Generator. Die dissipativen Verluste in diesen Systemkomponenten werden wiederum durch Wirkungsgrade beschrieben.

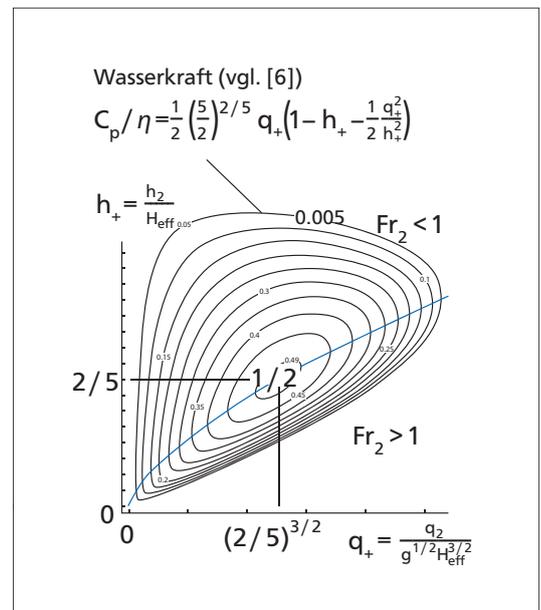
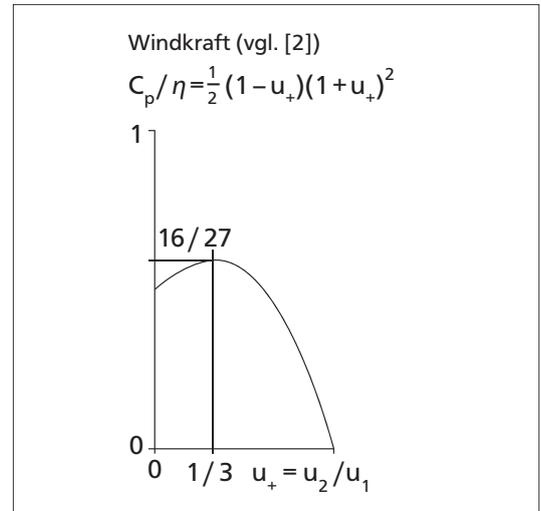
Der Nutzen der Betzschen Analyse hat zwei Aspekte:

**Erstens** ist eine klare Messlatte für die Energieausbeute einer Windströmung gegeben und zwar unabhängig von der Art der Maschine (z. B. horizontale oder vertikale Drehachse).

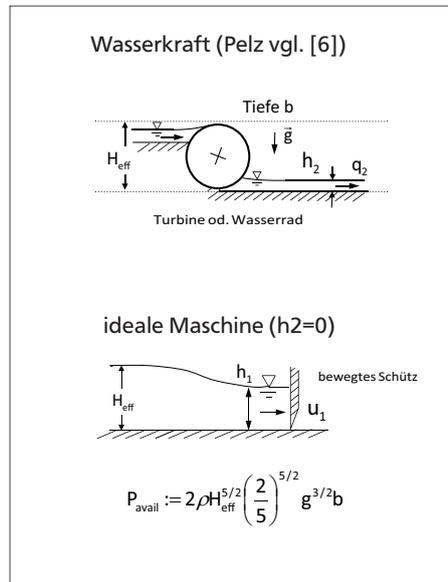
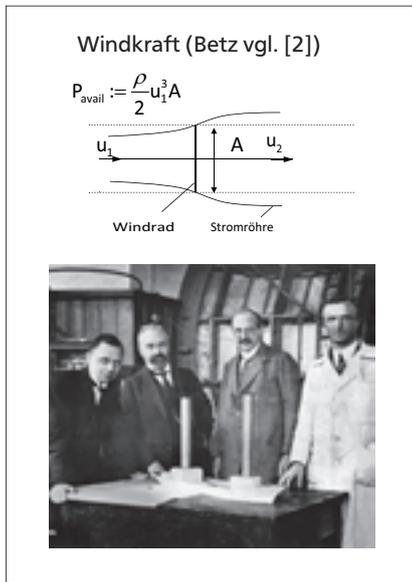
**Zweitens** wird das Betzsche Ergebnis genutzt, um Windräder gezielt auszuliegen.

So zeigte bereits Betz, dass mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Anströmgeschwindigkeit der Materialbedarf sinkt, wodurch die leistungsspezifischen Investitionskosten reduziert werden [3].

Die Abnahme der Baugröße und damit des Materialbedarfs mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit



keit passt wie der Wirkungsgrad unter das Stichwort „Skalierung“. Das für Windräder geltende, gilt genauso für hydraulische Maschinen. Wasserräder sind im Kern hydrostatische Maschinen, die langsam drehen. Bei gleichem Gefälle und Volumenstrom ist der Materialeinsatz für Turbomaschinen deutlich reduziert (bei hydrostatischen Antrieben gilt dieses so nicht, da der Druck nur durch die Materialfestigkeit begrenzt ist). Der hohe Materialbedarf ist der eigentliche Grund dafür, dass heute praktisch keine Wasserräder mehr zu finden sind. Bei gleicher Leistungsumsetzung sind die Investitionskosten bei Turbinen signifikant kleiner (vgl. auch [4], [6]). Die historische Entwicklung demonstriert die Wichtigkeit der leistungsspezifischen Investitionskosten, welche bei Kleinwasserkraftwerken um den Faktor 6 über denen von Windturbinen liegen [5].



Vor diesem Hintergrund ist die Optimierungsfrage zu stellen:

*Welche mechanische Leistung kann maximal aus einer Wasserströmung mit freier Oberfläche gewonnen werden?*

Die Antwort auf diese Frage ist in dreifacher Hinsicht von Interesse:

**Erstens** können technisch-konstruktiv unterschiedliche hydraulische Maschinen auf einer objektiven Basis verglichen werden. Dies ist für eine seriöse ingenieurwissenschaftliche Diskussion unerlässlich. **Zweitens** kann die Gesellschaft, d. h. Politik und Investoren, auf der Basis realistischer oberer Grenzen Entscheidungen fällen.

**Drittens** und letztens: Wie bei Windkraftmaschinen dient die Obergrenze als ein Anreiz, Maschinen mit geringen leistungsspezifischen Investitionskosten zu entwickeln.

Interessant ist, dass die Frage bis vor kurzem nicht gestellt wurde. Tatsächlich ist sie für große Wasserkraftanlagen bzw. große Gefälle nicht relevant. Für Wasserkraftwerke mit kleiner Leistung aber umso mehr!

Die Frage nach der zur Verfügung stehenden Leistung ist bei einer Wasserkraftanlage schwieriger zu beantworten als bei einer Windkraftanlage. Die ideale Maschine ist eine Maschine ohne Unterwasser, wie sie Abbildung 6b unten zeigt. Im Gedankenexperiment [6] stellt man sich das Gerinne aufgestaut bis zur effektiven Höhe vor. Die effektive Höhe ist der ungestörten Windgeschwindigkeit beim System Windkraft analog und beschreibt das Energieangebot.

**Abbildung 6a, b**  
Windkraft- und Wasserkraftsystem.

Unten links in der Abbildung: Jakob Ackeret, Ludwig Prandtl, Albert Betz und Adolf Busemann vor einem Modell des Flettner Rotorschiffes.

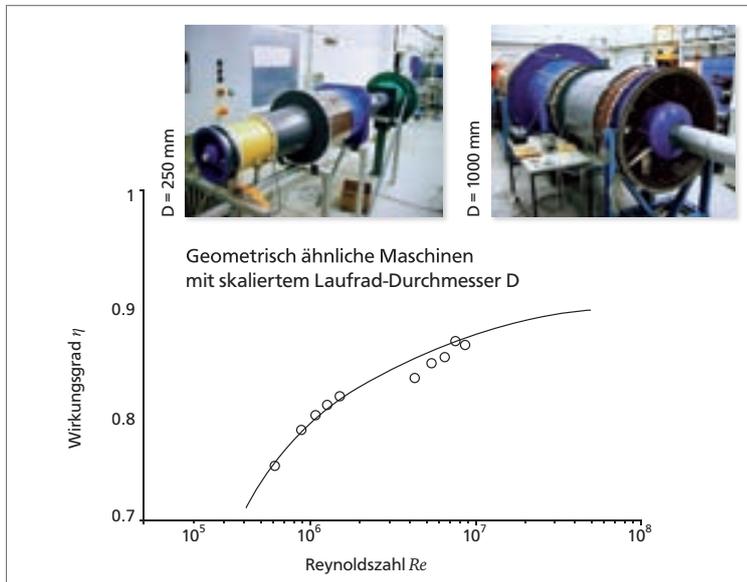
**Abbildung 7**  
Modell eines Wellenkraftwerks am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt.

Eine Analyse zeigt: Wird das Schütz mit  $\sqrt{2}/2$  der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bewegt, dann wird gerade die in Abbildung 6 gezeigte verfügbare Leistung erreicht, welche die Bezugsgröße zur Definition der Leistungsziffer (Erntefaktor) ist.

In Abbildung 6b rechts ist die **Optimierungsaufgabe** für die Wasserkraftanlage dargestellt [6]. Ungeachtet von gesetzlichen Vorgaben (z. B. durch das Wasserrecht) sind prinzipiell die Spiegelhöhe des Unterwassers und der Volumenstrom pro Tiefeneinheit im Unterwasser frei einstellbar. Wichtiges Ergebnis ist die maximal erreichbare Leistungsausbeute von  $\eta \rho g^{3/2} H_{\text{eff}}^{5/2} (2/5)^{5/2} b$ , welche selbst bei einem Wirkungsgrad  $\eta$  von Eins exakt die Hälfte der idealen Maschine ohne Unterwasser ausmacht (Massenkraft der Schwere  $g$ , Wasserdichte  $\rho$ , Breite des Gerinnes  $b$ , effektive Höhe  $H_{\text{eff}}$ )!

Betrachtet man andere Fluidkraftsysteme so trifft man immer wieder analoge Optimierungsaufgaben. Bei dem in Abbildung 5 dargestellten Zweimassenschwinger, der als Modell für ein Wellenkraftwerk dient, ist die dem System entziehbare Leistung dann maximal, wenn das System in der Resonanz arbeitet und die Kraft des Absorbers (das hydrostatische arbeitende, rote Bauteil in Abbildung 7 stellt den Absorber dar) optimal eingestellt ist.

Will man die potentielle Energie eines Gasspeichers in mechanische Leistung umsetzen, so ist die Leistung dann maximal, wenn das Gas nach der Entspannung durch eine Turbine Umgebungs-



**Abbildung 8**  
Die Skalierungsaufgabe am Beispiel von Axialmaschinen. Je größer die Maschine, je größer die Drehzahl, desto größer der Wirkungsgrad.

druck und Umgebungstemperatur erreicht. Auch dies ist eine Optimierungsaufgabe in dem oben beschriebenen Sinne über welche die Exergie eines Gases definiert ist [7].

#### Die Skalierungsaufgabe im Kontext der Fertigungskosten

Mit dem Wirkungsgrad aber auch mit der Schnelligkeit (dimensionslose Drehzahl) der Maschine kommt die zweite Aufgabe ins Spiel, die **Skalierungsaufgabe**. Es wurde deutlich, dass die Optimierungsaufgabe immer das System betrifft. Hieraus folgen die Anforderungen an das Modul, d. h. hydraulische Maschine, Absorber, .... Im Modul können die physikalischen Parameter Durchmesser, Drehzahl, Rauheit, Spalt usw. skaliert werden.

Der Wirkungsgrad ist ein Maß für die dissipativen Reibungsverluste bezogen auf die Gesamtleistung. Generell gilt: Je kleiner der Anteil der dissipativen Reibungskräfte an den gesamten (Strömungs-) Kräften, desto höher ist der Wirkungsgrad. Bei Strömungsvorgängen ist das angesprochene Verhältnis durch den Kehrwert der Reynolds-Zahl beschrieben. Die Reynolds-Zahl ist bei einer rotierenden Maschine proportional dem Quadrat des Durchmessers, proportional der Drehzahl und umgekehrt proportional der kinematischen Viskosität. Daraus folgt zwangsläufig: Mit zunehmendem Maschinendurchmesser und mit zunehmender Drehzahl wächst der Wirkungsgrad asymptotisch bis zu einem Grenzwirkungsgrad.

Von ökonomischer Bedeutung ist hierbei die Frage nach dem Einfluss der Fertigung und Fertigungs-

qualität auf den Wirkungsgrad. Je kleiner der relative Spalt zwischen rotierenden Schaufeln und Gehäuse, desto größer ist der Wirkungsgrad und desto geringer ist in der Regel auch die Schallabstrahlung. Auf der anderen Seite ist ein enger Spalt technische aufwendiger herzustellen als ein weiter Spalt was sich in den Bauteilkosten niederschlägt. Analoges gilt für die relative Rauheit. Hier ist zu beachten: Ist die typische Rauheit kleiner als die sogenannte viskose Unterschicht der turbulenten Strömung, dann verbessert eine weitere Reduktion der Rauheit den Wirkungsgrad durch Fertigungsschritte nicht mehr. Vergleicht man Abbildung 8 mit Abbildung 4 so ist der Unterschied zwischen Skalierung und Optimierung nochmals deutlich. Im letzten Fall muss man optimal auf ein Energieangebot (für ein Fluidkraftsystem) bzw. eine (Volumenstrom-) Forderung für ein Fluidarbeitssystem reagieren.

#### Skalierung von Antriebssystemen

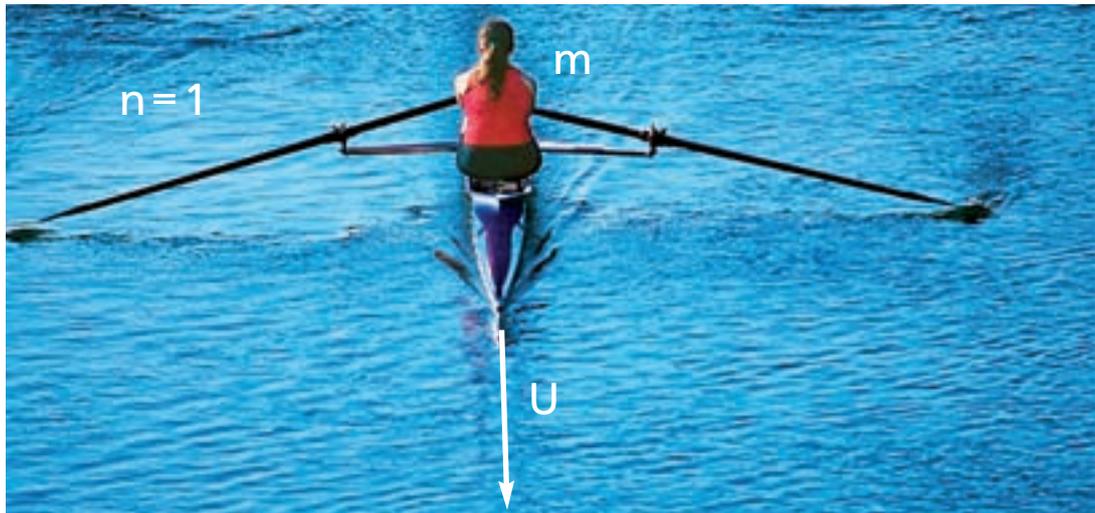
Im Kontext von Skalieren muss auch über das **Skalieren von Antriebssystemen** gesprochen werden welches aus folgendem Grund zur oben genannten Skalierung unterschiedlich ist: Bei Antriebssystemen (Luft-, Wasser-, Landfahrzeuge) ist zu beachten, dass mit zunehmender Antriebsleistung auch das Gewicht des Antriebes steigt, d.h. trivialerweise muss sich der Antrieb selbst bewegen. System und Modul sind nicht derart trennbar wie bei Fluidarbeits- und Fluidkraftsystemen. Mit welchen Methoden solche Skalierungsprobleme behandelt werden soll wiederum an einem anschaulichen Beispiel, dem Rudern, gezeigt werden [9].



**Peter Pelz** ist seit 2006 Professor an der TU Darmstadt. Er leitet das Institut für Fluidsystemtechnik im Fachbereich Maschinenbau.



**Ulf Lorenz** ist seit 2007 an der TU Darmstadt, seit 2008 als Privatdozent. Er leitet eine eigene kleine Arbeitsgruppe innerhalb der Diskreten Optimierung im Fachbereich Mathematik.



**Abbildung 9**  
Wie hängt die Bootsgeschwindigkeit  $U$  von der Zahl der Ruderer  $n$ , dem Geschlecht und der Masse des einzelnen Ruderers  $m$  ab?

Beim Rudern nimmt die Zahl der (biologischen) Antriebseinheiten die Werte 1 (Einer), 2, 4 oder 8 (Achter) an. Das Einführungsbild, Abbildung 1, zeigt einen Doppelvierer, der von  $n = 4$  Ruderern angetrieben wird. Bei rein technischen Systemen ist  $n$  z.B. die Zahl der Motoren, Zylinder, .....

*Es stellt sich die Frage um wie viel das Boot mit  $n$  Ruderern schneller ist als das Boot mit einem Ruderer oder einer Ruderin.*

(Dabei wird der in der Psychologie bekannte Ringelmann-Effekt nicht beachtet.) Eine geometrische Analyse zeigt, dass Ruderboote zueinander geometrisch ähnlich sind. Damit führt eine Dimensionsanalyse zu dem Ergebnis, dass die Bootsgeschwindigkeit wie die Zahl der Ruderer hoch  $1/9$  wächst. Man gelangt zu diesem Ergebnis sehr elegant, wenn neben Zeit, Masse und Länge auch die Zahl der Ruderer als physikalische Basisgröße definiert wird.

#### Literatur

[1] Redtenbacher, F.: Theorie und Bau der Wasserräder, Friedrich Bassermann; Mannheim; 1846

[2] Betz, A.: Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren; Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen; 20. September 1920

[3] Betz, A.: Einführung in die Theorie der Strömungsmaschinen; Braun; Karlsruhe; 1959

[4] Cordier, O.: Ähnlichkeitsbedingungen für Strömungsmaschinen; VDI; Berlin 1955

[5] Giesecke J., et. al.: Wasserkraftanlagen - Grundsätze der Planung und Projektierung; Springer; Berlin; 2009

[6] Pelz, P. F.: On the upper limit for hydropower in an open channel flow; ASCE Journal of Hydraulic Engineering; 2011

[7] Becker, E.: Technische Thermodynamik; Teubner; Stuttgart; 1985

[8] Spurk, J. H.: Dimensionsanalyse in der Strömungslehre; Springer; Berlin; 1992

[9] Mang, J.: Ähnlichkeitstheorie beim Wettkampfrudern; Diplomarbeit am Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt; 2008

Im Ergebnis ist ein Achter um 16 % schneller als ein Zweier welcher mit vergleichbaren „Antriebseinheiten“, das sind die Ruderer, bewegt wird.

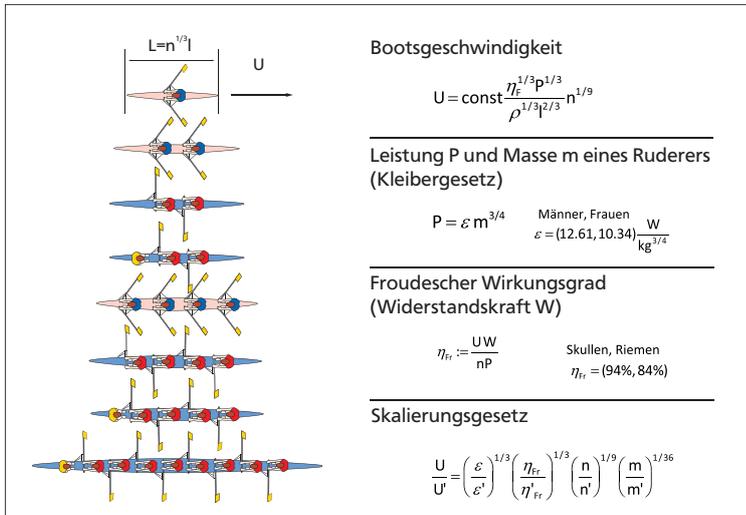
Nun ist der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit als wesentliches Funktionsmerkmal eines Ruderbootes und Masse des Ruderers von Interesse. Spannend ist, dass sich die Leistungsumsetzung von biologischen Systemen mit der (biologischen) Masse hoch  $3/4$  skaliert. In der Tat zeigt unsere Forschung, dass das Gesetz durch Leistungssportler sehr gut bestätigt wird und wir so die Proportionalitätskonstante sowohl für Frauen als auch für Männer anhand von geruderten Siegerzeiten bei Olympischen Spielen und Weltmeisterschaften mit kleiner Varianz bestimmen konnten. Im Resultat folgt daraus ein sehr allgemeines Skalierungsgesetz für die Bootsgeschwindigkeit mit dem erstaunlichen Ergebnis, dass ein 95 kg schwerer Ruderer eine Strecke von 2000 m nur 1 % schneller rudert als ein 73 kg schwerer Ruderer. Im Ergebnis macht das einen Zeitunterschied von etwa 4 Sekunden aus. Die von uns angewendeten Methoden, das heißt physikalische Modellbildung, Dimensionsanalyse und Messungen sind für andere Antriebssysteme völlig analog anwendbar.

#### Die Optimierungsaufgabe in der aktuellen Forschung

Fluidsysteme trifft man als Fluidkraftsysteme bei der Wandlung von hydraulischer bzw. aerodynamischer Leistung in mechanischer Leistung so wie oben beschrieben. Fluidarbeitssysteme sind Lüftungssysteme, Wasserversorgungssysteme und Systeme der Verfahrenstechnik.

Hinsichtlich des Energieverbrauchs sind diese Systeme signifikant: Die genannten Fluidarbeitssysteme verbrauchen ca. 10 % der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung.

Vergleicht man ein Fluidarbeitssystem wie die Wasserversorgung eines großen Gebäudes oder gar



einer Metropole, so ist der Unterschied in der Komplexität offensichtlich. Das oben beschriebene Windrad hat eine einfache Topologie bestehend aus Zuströmung, Windrad, Abströmung. In der Regel ist die Topologie bei Fluidarbeitssystemen deutlich komplexer. Zusätzlich erschwerend ist, dass die Bedarfshistorie (Wasser, Frischluft, ...) mit Unsicherheiten behaftet ist.

Diese Fragestellungen erfordern, wie im durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereich 805 „Unsicherheiten in lasttragenden Systemen“ (Sprecher Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka), praktiziert, eine kooperative Forschung zwischen Mathematik und Ingenieurwissenschaften. Erste Schritte in diese Richtung sind getan.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Für alle Ingenieurbereiche ist der Begriff Energieeffizienz wichtig aber unpräzise. Versteht man den Weg zur Energieeffizienz als ein zweistufiges Verfahren, nämlich in erster Linie eine Optimierung des Systems und in zweiter Linie eine Skalierung (des Wirkungsgrades), so kann eine Diskussion sachlich geführt werden.

Ein altes und schönes Beispiel, ein Wasserrad, welches jedem vertraut ist, zeigt, dass Präzisierungen hilfreich und notwendig sind.

Bei fluidtechnischen Systemen besteht die Herausforderung heute unseres Erachtens weniger in der Verbesserung des Wirkungsgrades einzelner Module eines Systems, als vielmehr darin, das Gesamtsystem zu optimieren (**Optimierungsaufgabe**). Erst hieraus lassen sich wieder umgekehrt die technischen Anforderungen an das Modul ableiten. Die physikalisch technische **Skalierungsaufgabe** im Sinne der Dimensionsanalyse [8] hat hier insbesondere eine ökonomische Relevanz, denn häufig sind leistungsspezifische Kosten für den Markt dominante Entscheidungskriterien.

**Abbildung 10**  
Die Skalierung eines Antriebssystems am Beispiel von Ruderbooten. Froudescher Wirkungsgrad  $\eta_{fr}$  und Kleiberkonstante  $\varepsilon$  sind über die Siegerzeiten auf 2000 m bei Weltmeisterschaften und Olympischen Spielen bestimmt [9].



University Relations

Unser kostenloses Angebot für die TU Darmstadt:

Durchführung von praxisnahen Lehrprojekten im all-inclusive-Paket. Wir unterstützen Sie umfassend - vor, während und nach der Projektdurchführung.

- Kostenlose Softwarelizenzen.
- Innovationsförderung und Forschungsk Kooperation im Rahmen von strategischen Partnerschaften.
- Gastvorträge und Firmenbesuche.
- Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten.
- Praktika und Werkstudentenstellen in unserem Headquarters.

Wir freuen uns auf Sie.  
[www.softwareag.com/jobs](http://www.softwareag.com/jobs)  
[www.softwareag.com/university](http://www.softwareag.com/university)

Software AG ist weltweit führend im Bereich Business Process Excellence. Seit über 40 Jahren steht unser Name für Innovation: Adabas, die erste transaktionale Hochleistungsdatenbank, ARIS, die erste Plattform zur Analyse von Geschäftsprozessen, und webMethods, der erste B2B-Server und die erste SOA-basierte Integrationsplattform.

Wir liefern unseren Kunden Produkte, Lösungen und Services für das Management von Geschäftsprozessen (BPM), die sich durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit bei niedriger Total-Cost-of-Ownership auszeichnen und die vollständige Lieferkette abdecken. Unsere branchenführenden Marken ARIS, webMethods, Adabas, Natural, CentraSite und IDS Scheer Consulting fügen sich zu einem einzigartigen Portfolio zusammen. Wir bieten Software und Services für den Entwurf von Prozess-Strategien sowie das Design, die Implementierung und die Überwachung von Prozessen; SOA-basierte Integration und Datenmanagement; prozessgesteuerte SAP-Implementierung sowie strategische Prozessberatung und Dienstleistungen.

Software AG | Uhlandstraße 12 | 64297 Darmstadt  
[www.softwareag.com](http://www.softwareag.com)

# Energieeffizienz

## spanender Werkzeugmaschinen

Eine moderne Produktionsmaschine mittlerer Größe verbraucht im Jahr etwa so viel Strom wie 12 Einfamilienhäuser. Dass das nicht sein muss, konnte durch Forscher der TU Darmstadt bereits eindrucksvoll unter Beweis gestellt werden. Die Möglichkeiten zur Einsparung sind vielfältig, haben bis dato jedoch kaum jemanden interessiert. Damit sich das ändert, wird derzeit eine Software entwickelt, die die Prognose und Simulation von Energie- und Stoffverbräuchen ermöglicht. Ziel ist es, durch größtmögliche Transparenz eine solide Entscheidungsgrundlage für Investitionen in Energiesparmaßnahmen zu schaffen.

### ► Energy efficiency of cutting machine tools

*A modern medium-sized machine tool consumes approximately 12 times more electrical energy than a one-family house. That there is great optimization potential has already been impressively demonstrated by researchers at the TU Darmstadt. The measures to gain savings are diverse, but so far they are not recognized by most of the involved parties. To change this, currently software is developed that allows the prediction and simulation of energy and material consumption. The aim is to provide maximum transparency for a solid decision basis for investments in energy saving measures.*

#### Eberhard Abele, Benjamin Kuhrke, Stefan Rothenbücher

• Die Senkung des Energiebedarfs durch die Erhöhung der Energieeffizienz ist eine der dringlichsten Herausforderungen unserer Zeit. Während in der Vergangenheit vor allem im Consumer-Bereich und dort zuvorderst bei weißer Ware wie Kühlschränken oder Waschmaschinen erhebliche Effizienzsteigerungen erzielt werden konnten, müssen sich seit einiger Zeit auch vermehrt Hersteller von Produktionsmaschinen mit dieser Thematik auseinandersetzen.

Auch wenn die Energiekosten spanender Werkzeugmaschinen bei der Beschaffung anderen Kriterien wie zum Beispiel den Investitionskosten oder der Zuverlässigkeit noch deutlich untergeordnet sind, hat sich in den vergangenen Jahren viel verändert. Die Europäische Kommission stellt derzeit den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen auf den Prüfstand. Große Unternehmen haben Energie- und Medienverbrauchsabfragen in ihre Lastenhefte mit aufgenommen. Maschinenhersteller haben den Energieverbrauch ihrer Maschinen analysiert und setzen bereits erste Energiesparmaßnahmen um. Nicht zuletzt die Lieferanten von Komponenten wie der Hydraulik oder der

Maschinenkühlung haben die aktuellen Entwicklungen aufgenommen und ihr Spektrum um effizientere, bedarfsgerecht geregelte Funktionsmodule ergänzt.

#### Den Energiefressern auf der Spur

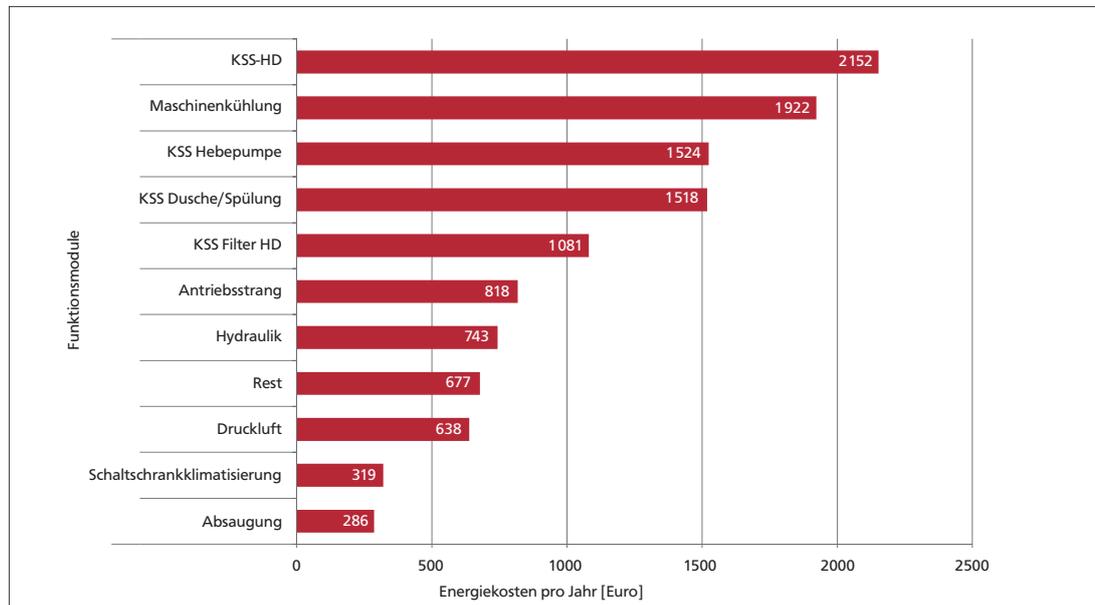
Im Dezember 2008 startete das Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt das vom BMWi geförderte Projekt „Maxiem – Maximierung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen“ mit dem Anspruch, die Grundlagen auf dem Gebiet der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen auf breiter Front voranzutreiben. Im Mittelpunkt des Projektes steht die Identifikation und Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen an einer Demonstratormaschine.

Ein Konsortium aus Anwendern, Maschinen-, Komponentenherstellern und universitärer Forschung untersucht daran, wie sich der Energieverbrauch in den verschiedenen Betriebszuständen sowohl durch Hardware-Umbauten aber auch durch intelligente Maschinensoftware reduzieren lässt. Dazu wurde das Bearbeitungszentrum XS211 des Projektpartners MAG Powertrain definiert, welches vorwiegend als Systemmaschine in agilen Fertigungslinien in der Automobilindustrie zur Fertigung von Powertrain-Komponenten wie zum Beispiel Zylinderköpfe, Motorblöcke und Getriebegehäuse eingesetzt wird. Zunächst wurde die Maschine einer umfassenden Ist-Analyse unterzogen.

Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass vor allem die Energiekosten rund um die Kühlschmierstoffversorgung (KSS) mit über 50 % den mit Abstand größten Anteil ausmachen. Die drei Niederdruckpumpen zur Kühlung und Schmierung des Bearbeitungsprozesses und zur Spülung des Arbeitsraumes, im Vorlauf zum Filter der Hochdruckpumpe und die Hebebombe verursachen gemeinsam rund ein Drittel der Energiekosten während die Hochdruckpumpe mit 18 % der größte Einzelverbraucher ist. Danach folgen die Kühlaggregate, wobei der Rückkühler zur Spindel und Hydrauliktemperierung mit 17 % einen deutlich höheren Anteil hat als das Schaltschrankklimatisierungsgerät mit 3 %. Der übrige Bedarf von rund einem Drittel verteilt sich auf die Hydraulik, den Ölnebelabscheider, die Druckluft und den Antriebsstrang.



**Abbildung 1**  
Jahresenergiekosten  
der einzelnen  
Funktionsmodule  
der Demonstrator-  
maschine  
MAG XS 211.



### In Pausenzeiten Energie sparen

Ein großer Teil des jährlichen Energiebedarfs wird dadurch verursacht, dass Maschinen in ungeplanten Zeiten wie einer freien Schicht und dem Wochenende aber auch bei Fertigungsstillständen aus zum Beispiel organisatorischen Gründen in voller Betriebsbereitschaft verbleiben. Die anfallende Grundlast wird in der Regel durch die Nebenaggregate sowie die in Regelung belassenen Antriebe dominiert und liegt bei allen bisher vom PTW untersuchten Bearbeitungszentren im mittleren bis hohen einstelligen Kilowattbereich.

Zur Senkung der Leistungsaufnahme in bearbeitungsfreien Zeiten wurde in der Maxiem-Demonstratormaschine in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Bosch Rexroth auf der Steuerung ein Standby-Manager implementiert. Die Maschine wird dadurch in die Lage versetzt, einzelne Funktionsmodule bei Eintritt definierter Ereignisse selbstständig in einen energieärmeren Zustand zu schalten. Ereignisse können dabei von der Maschine selbst erzeugt werden (zum Beispiel bei länger andauernder Inaktivität) oder von

einem externen Signal ausgelöst werden. Externe Ereignisse können beispielsweise ein von einer Beladeeinrichtung gemeldeter Teilemangel oder der Befehl von einer übergeordneten Fertigungssteuerung zum Schichtende sein. Die Zeit, nach der die Maschine in den Standby-Modus wechselt, kann dabei frei parametrierbar sein. Die prognostizierte jährliche Energieeinsparung durch die Standby-Schaltung beträgt an der Demonstratormaschine für das Nutzungsprofil 3-Schicht-Serienfertigung ca. 25 MWh (23 % des Gesamtenergieverbrauchs).

### In Nebenaggregaten schlummern Effizienzpotenziale

KSS-Hochdruckpumpen werden beim Bohren und Fräsen bei Werkzeugen mit innerer Kühlmittelzufuhr (IKZ) durch die Hauptspindel zur Kühlung, Schmierung und zum Spanabtransport eingesetzt. Bei herkömmlichen Systemen wird eine Schraubenspindelpumpe über einen Motor mit nahezu konstanter Drehzahl direkt am Netz betrieben und fördert ihren gesamten Volumenstrom gegen ein fest eingestelltes Druckregelventil. Die elektrische Leistungsaufnahme ist dabei unabhängig vom tatsächlich benötigten Volumenstrom konstant, wodurch vor allem bei Werkzeugen mit kleinen Kühlkanaldurchmessern hohe Differenzen zwischen eingesetzter elektrischer Leistung und tatsächlich benötigter Fluidleistung entstehen. Einsparpotenziale liegen deshalb hauptsächlich in der bedarfsgerechten Bereitstellung eines dem Werkzeug bzw. dem Kühlkanaldurchmesser angepassten Volumenstroms.

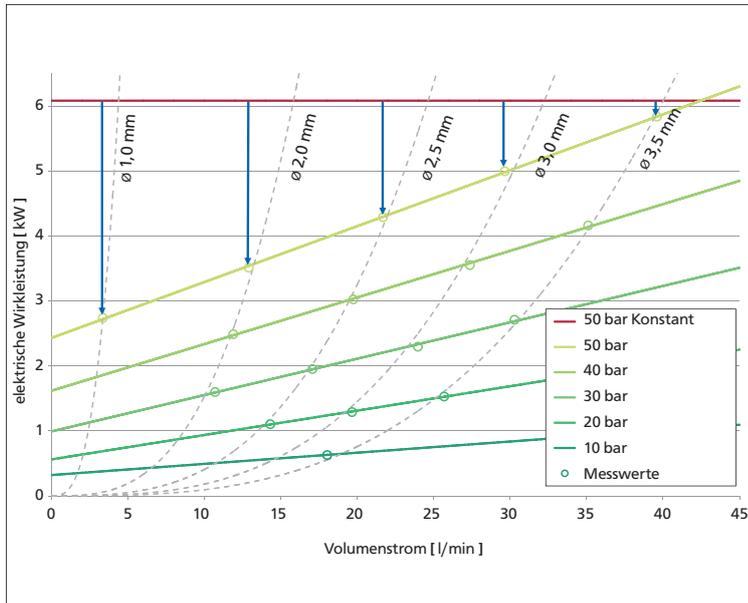
Um die genannten Einsparpotenziale verwirklichen zu können bietet sich der Einsatz eines drehzahl- bzw. druckgeregelten Pumpenmotors

Institut für Produktionsmanagement,  
Technologie und  
Werkzeugmaschinen (PTW)

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Benjamin Kuhrke  
Tel. 06151/16-6619  
E-Mail: kuhrke@ptw.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Stefan Rothenbücher  
Tel. 06151/16-5480  
E-Mail: rothenbuecher@ptw.tu-darmstadt.de  
[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)



**Abbildung 2** Leistungskennlinienfeld der drehzahlregulierten Hochdruckpumpe im Vergleich zur Konstantpumpe und Leistungs-Anlagenkennlinien von Werkzeugen mit unterschiedlichen Kühlkanaldurchmessern.

an. Die Anlage muss dazu um einen Frequenzumrichter zur drehzahlvariablen Ansteuerung des Motors sowie um einen analogen Drucksensor zur Erfassung des aktuellen Drucks erweitert werden. Weiterhin muss in der Steuerung die Möglichkeit geschaffen werden, einen Drucksollwert über das NC-Programm vorgeben zu können. Die Regeldifferenz aus Druck-Sollwert und Druck-Istwert wird einem PI-Regler zugeführt, dessen Ausgang einem Drehzahlsollwert entspricht, der wiederum direkt an den Frequenzumrichter übertragen wird.

In Abbildung 2 ist das Leistungskennlinienfeld für eine beispielhafte Umsetzung an der MAXIEM-Demonstratormaschine mit einer 7,5 Kilowatt Hochdruckpumpe dargestellt. Der Vergleich der Leistungsaufnahmen der Konstantpumpe und der

**Literatur**

Abele, Eberhard; Kuhrke, Benjamin; Rothenbücher, Stefan: Entwicklungstrends zur Erhöhung und Bewertung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen; in: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2010.

Rothenbücher, Stefan; Kuhrke, Benjamin: Energiekosten bei spanenden Werkzeugmaschinen: Energiebündel auf dem Prüfstand, in: Werkstatt und Betrieb, Carl Hanser Verlag, München, Ausgabe 143 (9), 2010.

drehzahlregulierten Pumpe bei 50 bar, gekennzeichnet durch die blauen Pfeile, zeigt, dass sich durch die bedarfsgerechte Ansteuerung bei kleinen Volumenströmen Einsparungen von über 50 % erzielen lassen. Durch die Möglichkeit der Druckabsenkung können weitere Einsparungen erzielt werden, sofern dies der Prozess zulässt.

Der Energieverbrauch pro Jahr sinkt unter Zugrundelegung praxisnaher Nutzungsprofile von 15,3 MWh bei der Konstantpumpe um 56 % auf 6,7 MWh bei der drehzahlregulierten Pumpe. Unter Berücksichtigung der verhältnismäßig geringen Mehrinvestition für den Frequenzumrichter und den Drucksensor ergibt sich somit eine kurze Amortisationszeit, die je nach Anschaffungspreis bei einem bis eineinhalb Jahren liegt.

**Entscheidungsgrundlage durch Transparenz**

Welche Einsparpotenziale bei Produktionsmaschinen bestehen, konnte in detaillierten Analysen gezeigt werden. Da diese in der Regel höhere Investitionen bedeuten, kommt es jetzt vor allem darauf an, den Betreibern die Energiekosten transparent darstellen zu können, um eine geeignete Entscheidungsgrundlage bereitzustellen. Darüber hinaus muss der bereits begonnene Umdenkungsprozess in den Unternehmen weg von den rein Anschaffungskosten getriebenen Investitionen hin zu auf Lebenszykluskosten basierenden Entscheidungen weiter verfolgt werden. Hierzu wird am PTW derzeit eine Software entwickelt mit der der Energieverbrauch spanender Werkzeugmaschinen sehr genau simuliert und prognostiziert werden kann. Das Feedback aus der Industrie ist diesbezüglich sehr gut, wird doch auch hier der eingeschlagene Weg deutlich befürwortet.



**Eberhard Abele** ist seit 2000 Professor für Produktionstechnik an der TU Darmstadt und Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW).



**Benjamin Kuhrke** ist seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am PTW. Seit 2008 leitet er die Forschungsgruppe Umweltgerechte Produktion.



**Stefan Rothenbücher** ist seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Werkzeugmaschinen und Komponenten des PTW.

# Kohlenstofffasern inspirieren den Werkzeugmaschinenbau

Die Kohlenstofffasern, die in der Luft- und Raumfahrt eine beeindruckende Erfolgsgeschichte geschrieben haben, halten Einzug in den Werkzeugmaschinenbau. Das Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen – kurz KLuB – hat gemeinsam mit dem Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen – kurz PTW – hier einen Forschungsschwerpunkt gesetzt. Die Motorspindel als Kernkomponente jeder modernen Werkzeugmaschine dient dabei als Referenzbauteil. Ziel ist es, ohne Qualitätseinbußen den Werkzeugstahl der Spindelwelle vollständig durch CFK zu ersetzen. Dazu müssen die besonderen Werkstoffeigenschaften von CFK konstruktiv berücksichtigt werden.

## ► *Carbon fibers inspire tooling machine design*

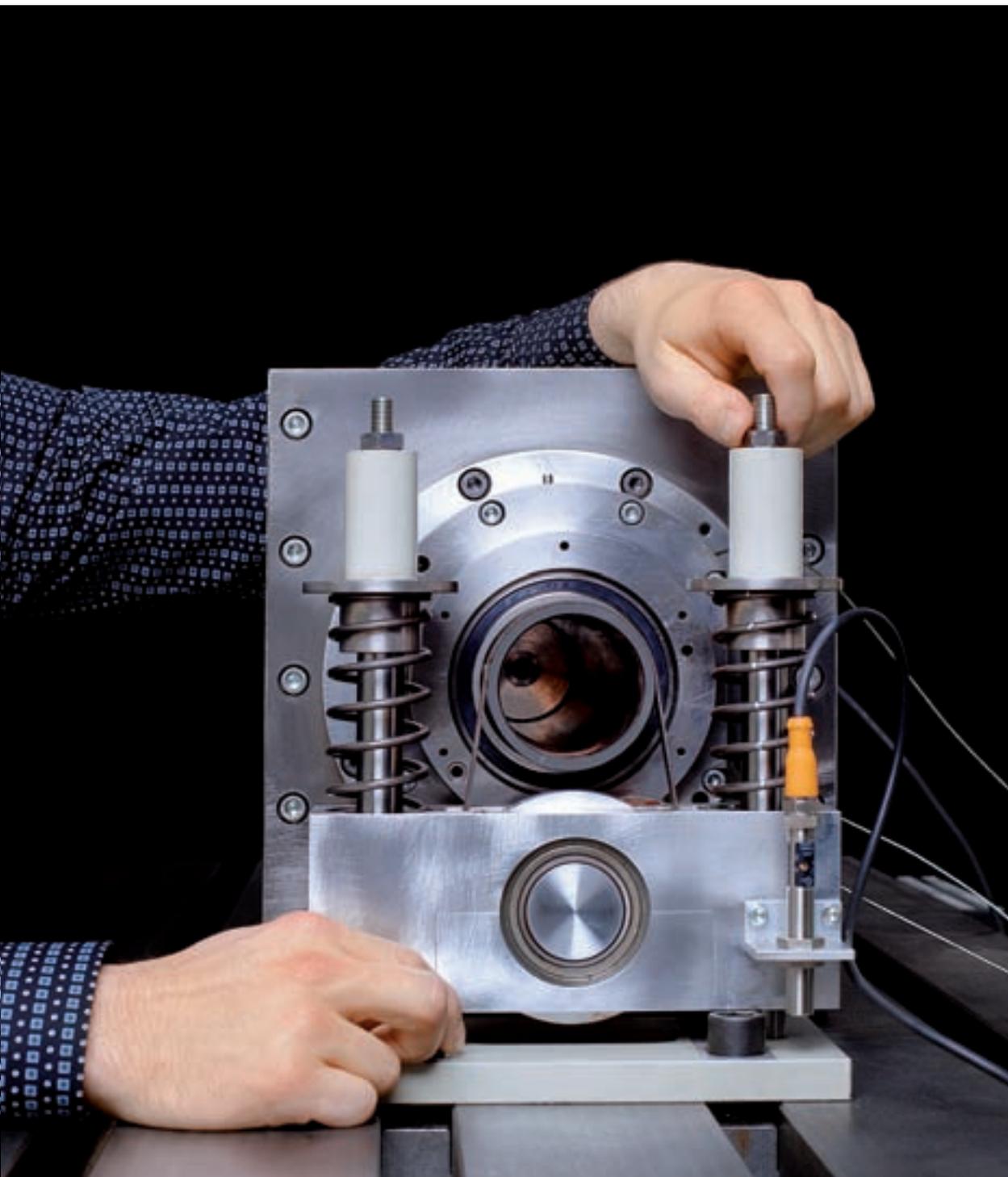
*Carbon fibers, which wrote an impressive success story in the aerospace industry, are finding their way into tooling machines. The Institute for Lightweight Design and Structures – in short KLuB – sets together with the Institute for Production Management, Technology and Machine Tools – in short PTW – a research focus on this development. The motorized spindle unit represents the key component of modern tooling machines and is used as benchmark part. The goal is to substitute the steel of the spindle-shaft with cfrp, while maintaining the overall performance. In order to do so the special material properties need to be considered within the design process.*

**Helmut Schürmann, Eberhard Abele, Martin Klimach** • Durch das wirtschaftliche Erstarken Asiens drängen immer mehr Mitbewerber auf den globalen Werkzeugmaschinenmarkt. Vor allem China und Indien machen mit einfachen, kostengünstigen Werkzeugmaschinen Druck auf etablierte Hersteller, die sich nur durch einen Technologievorsprung behaupten können. Allerdings strebt auch die asiatische Konkurrenz zunehmend in den High-End-Bereich von Werkzeugmaschinen (Abbildung 1).

Aus diesem Grund wird die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie ihre technologische Führung nur ausbauen können, wenn es ihr gelingt, zukunftssträchtige Themen frühzeitig aufzugreifen und die Grundlagen für die Anwendung neuer Technologien zu entwickeln.

Die Forderung des Markts nach weiteren Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen wird nur erfüllbar sein, wenn die dynamisch am höchsten be-



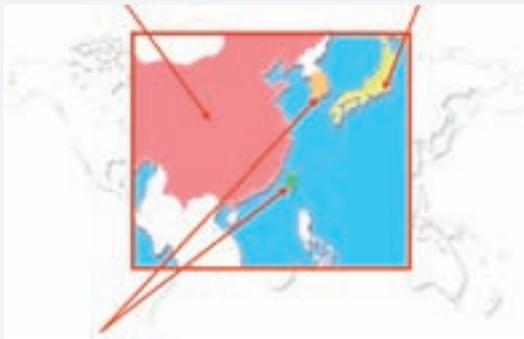


Feinjustage  
des Prüfstands für  
CFK-Spindelwellen.

## Veränderungen im weltweiten Werkzeugmaschinenmarkt

## China

- Weltgrößter Werkzeugmaschinen-Konsument
- Größter Markt für deutsche Werkzeugmaschinen
- Drittgrößter Werkzeugmaschinen-Produzent im Bereich „Low-Tech“-Maschinen

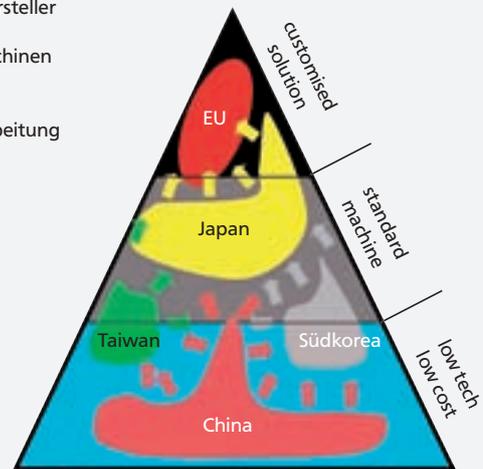


## Taiwan/Südkorea

- Wichtiger Werkzeugmaschinen-Hersteller im Bereich „Low“- und „Middle“-Tech-Maschinen
- Erste Erfahrungen im High-End-Bereich

## Japan

- Weltgrößter Werkzeugmaschinen-Hersteller
- Stärke im Bereich Standard-Werkzeugmaschinen
- Entwicklungstendenzen:
  - 5-Achs-Maschinen
  - Mehrtechnologiebearbeitung



anspruchten Strukturkomponenten optimiert werden. Zur Steigerung der Dynamik und der Bahngenaugkeit ist in erster Linie konsequenter Leichtbau zielführend.

Leichtbau mittels Blechstrukturen und Aluminiumgusskonstruktionen ist im allgemeinen Maschinenbau bereits Stand der Technik und auch im Werkzeugmaschinenbau „ausgereizt“.

In vielen Bereichen der Industrie, speziell im Transportsektor, finden auch Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) bereits seit 50 Jahren ein stetig wachsendes Einsatzgebiet. Ob in Luft- und Raumfahrt, im Schiffs- und im chemischen Anlagenbau oder im Automobilbau, FKV sind Metallen in vielen Fällen überlegen. Hauptnachteile, die einem breiten Einsatz im Werkzeugmaschinenbau entgegenstehen, sind derzeit die mangelnde Wirtschaftlichkeit und die in einigen Bereichen noch fehlenden überzeugenden Konstruktionslösungen. Es besteht die berechtigte Hoffnung, dass mittels FKV-Lösungen die technologische Spitzenposition des deutschen Werkzeugmaschinenbaus ausgebaut werden kann.

Die Einführung von FKV-Komponenten in Werkzeugmaschinenunternehmen stellt indes konstruktiv, aber auch fertigungstechnologisch eine

große Herausforderung dar (Abbildung 2). In dem gemeinsamen Forschungsschwerpunkt von KLuB und PTW an der TU Darmstadt werden die methodischen Grundlagen für die Bewertung und ggf. Einführung von FKV-Komponenten in Werkzeugmaschinenunternehmen erarbeitet. Ziel ist es, den Wertschöpfungsbeitrag nicht aus den Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus abfließen zu lassen, sondern hier die notwendigen Kompetenzen für FKV-Technologien aufzubauen.

Konkret wird derzeit an einer Kernkomponente moderner Werkzeugmaschinen – der Motorspindel (Abbildung 3) – geforscht, um hier die technisch herausragenden Eigenschaften unter Beweis zu stellen.

## CFK – idealer Spindelwellen-Werkstoff

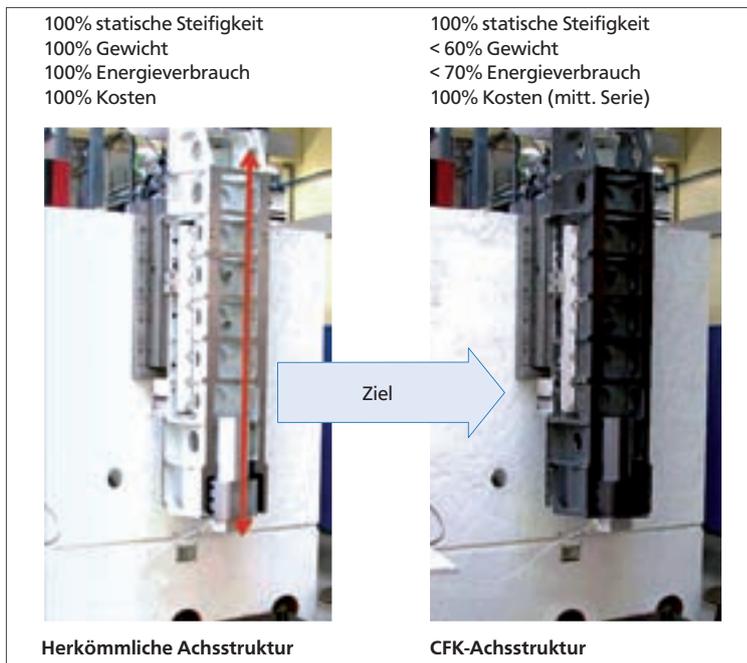
Da bei allen Beschleunigungsvorgängen die Masse linear in den Energiebedarf eingeht, bilden stark beschleunigte Bauteile, wie die Spindelwelle der Motorspindel, den idealen Ansatzpunkt zur Einführung von FKV in den Werkzeugmaschinenbau. Da hier das Verhältnis von Steifigkeit zu Dichte entscheidend ist, sind insbesondere hochsteife Kohlenstofffasern zum Stahlersatz prädestiniert. Sie erreichen im Verbund mit einer Kunststoffmatrix bei

## Motorspindeln – Herzstück moderner Werkzeugmaschinen

Die Suche nach leistungsfähigeren Antriebskonzepten im Werkzeugmaschinenbau hat zur Entwicklung der Motorspindeln – kurz MSP – geführt. Eine MSP zeichnet sich durch die Integration des elektrischen Antriebs in die Spindelwelle aus. So entfallen jegliche

Getriebe – und damit deren Verluste und Trägheiten – zwischen Antrieb und Werkstück. Meist sind MSP für hohe Drehzahlen und mit automatisiertem Werkzeugwechselsystem ausgestattet und finden ihren Einsatz in modernen Mehr-Achs-Bearbeitungszentren.

Abbildung 1  
Positionen und  
Tendenzen  
im globalen  
Werkzeug-  
maschinenmarkt.



**Abbildung 2**  
Beispiel und Anforderungen einer zu optimierenden Vorschubachse – die links in Al-Druckguss gefertigte Achsstruktur ist ein sehr gut geeignetes Objekt für eine Substitution mittels CFK.

einem Fünftel der Masse die gleiche Steifigkeit wie Stahl und dadurch eine deutlich höhere Eigenfrequenz.

Die Welle einer modernen 55 kW Motorspindel mit HSK 63 Werkzeugaufnahme wiegt mit Rotorpaket etwa 11 kg und wird beispielsweise in weniger als einer halben Sekunde auf 16.000 U/min beschleunigt. Das Gewicht der Welle lässt sich durch den Einsatz von CFK bei gleicher Biegesteifigkeit auf etwa 3 kg reduzieren. Das bedeutet eine Gewichtsreduktion von etwa 70 %. Dasselbe Verhältnis ergibt sich für den Energiebedarf bei allen Beschleunigungsvorgängen. Daran wird deutlich, welche Einsparpotenziale mittels Leichtbau erschließbar sind.

Es lassen sich aber noch weitere Vorteile konstruieren. So kann man die thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder die Umfangssteifigkeit, die für die Fliehkräftaufweitung verantwortlich ist, über Parameter im Fertigungsprozess einstellen. Allerdings sind bis zur erfolgreichen Substitution von Stahl durch CFK noch einige grundlegende Herausforderungen zu lösen.

#### Wellenauslegung auf Biegesteifigkeit

Bei der Auslegung von FKV-Wellen stehen dem Ingenieur deutlich mehr Konstruktionsparameter als bei Stahlwellen zur Verfügung. Zunächst gilt es die richtige Faser-Matrix Kombination zu wählen. Für höchste Steifigkeitsanforderungen sind hochmodulige Kohlenstofffasern eingebettet in eine Epoxid-Kunstharzmatrix am besten geeignet. Diese Fasern mit einem faserparallelen E-Modul von 430.000 N/mm<sup>2</sup> sind mehr als doppelt so steif wie Stahl. Im späteren Verbund belegen sie etwa 60 % des

#### CFK – Werkstoff der Zukunft

Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff (CFK) ist vielen aus der Luft- und Raumfahrt, aus dem Rennsport, oder von Sportgeräten her bekannt. Carbon – wie dieser Werkstoff-Verbund in der Marketingsprache oft genannt wird – weist auf die Dichte bezogen überragende Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Die Faser selbst wird überwiegend durch Graphitisierung eines PAN-Precursors gewonnen. Dabei können sehr hohe Elastizitätsmoduln (= 450.000 N/mm<sup>2</sup>) und Zugfestigkeiten (= 7.000 N/mm<sup>2</sup>) eingestellt werden. Die Fasern werden im Fertigungsprozess mit Kunstharz getränkt und in Formen ausgehärtet. Die späteren mechanischen Eigenschaften des Bauteils hängen stark von der Faserorientierung ab.

Volumens. Die formgebende Kunststoffmatrix nimmt das restliche Volumen ein. Der faserparallele E-Modul dieses FKV's liegt mit 233.000 N/mm<sup>2</sup> immer noch über dem Niveau von Stahl.

Die Tatsache, dass der E-Modul des Verbunds quer zu den Fasern nur rund 6.000 N/mm<sup>2</sup> beträgt, macht deutlich, wie wichtig es ist die Fasern sinnvoll zu orientieren.

Eine Schicht in der alle Fasern gleich orientiert sind wird unidirektionale – kurz UD – Schicht genannt. Das gesamte Bauteil ist aus vielen dieser UD-Schichten, die alle unterschiedlich zueinander orientiert sein können, aufgebaut.

Das Ziel maximaler Biegesteifigkeit der Spindelwelle erfordert es, einen Großteil der Schichten



**Helmut Schürmann** leitet seit 1994 das Fachgebiet KLuB – Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen des Fachbereichs Maschinenbau der TU Darmstadt. Schwerpunkt seiner Forschungsarbeiten ist der Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden.

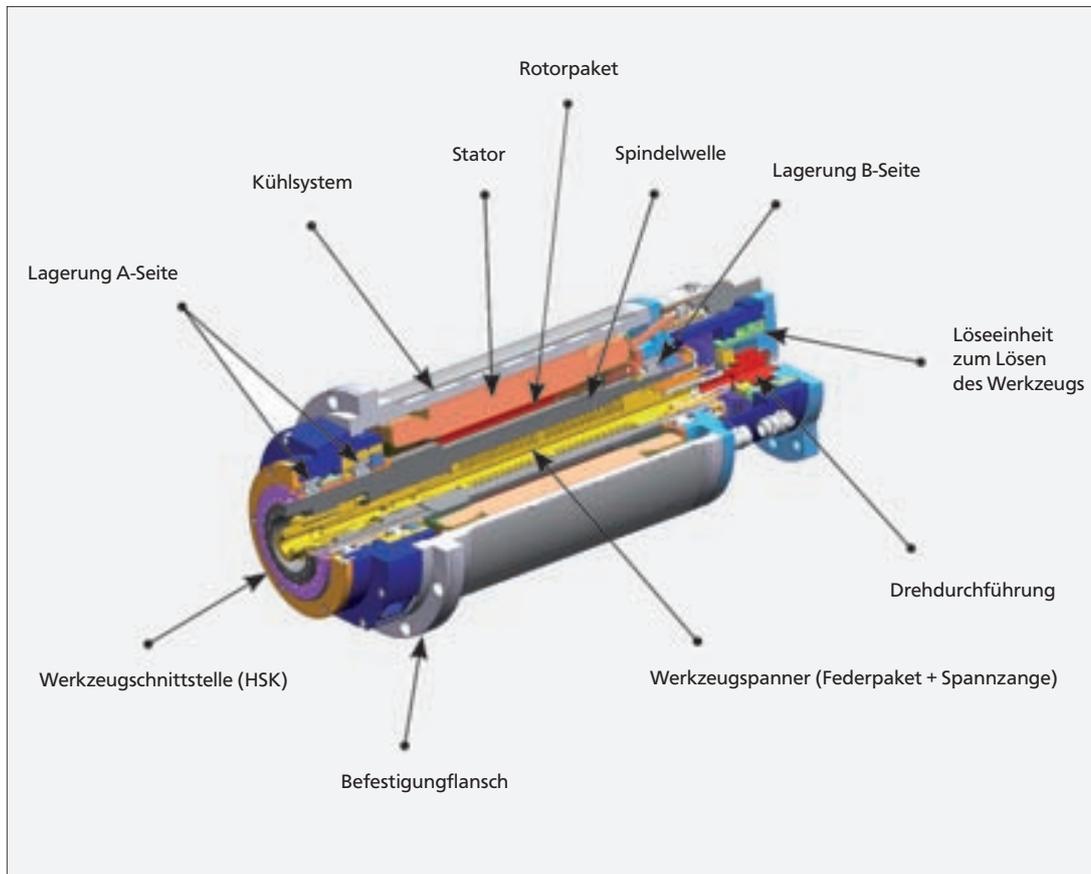


**Eberhard Abele** ist seit 2001 Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen im Fachbereich Maschinenbau.



**Martin Klimach** arbeitet seit 2009 am KLuB. Schwerpunkt seiner Forschungsarbeit ist der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden im Werkzeugmaschinenbau.

**Abbildung 3**  
Schnittbild einer  
konventionellen  
Motorspindel mit  
Benennung der  
Einzelkomponenten.



axial auszurichten. Der kleinste fertigungstechnisch sinnvolle Winkel liegt bei  $9^\circ$  zur Wellenachse. Für eine gute Laminatqualität und Aufnahme von Torsionsbeanspruchungen, müssen zusätzlich Schichten mit größerem Winkel eingebracht werden. Dabei kann die thermische Ausdehnung oder die tangentielle Steifigkeit der FKV-Welle über diesen zweiten Winkel gesteuert werden. Durch die überwiegend axiale Orientierung der Fasern wird bereits ein sehr geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient in axialer Richtung erzielt. Deshalb wird der zweite Winkel dazu genutzt, die Reaktion der Welle auf Fliehkräfte einzustellen.

#### Fliehkraftaufweitung am Lagersitz

Der E-Modul in Umfangsrichtung geht ebenso wie die Dichte linear in die Nachgiebigkeit einer Hohlwelle bezüglich Fliehkraft ein, der mittlere Durchmesser dagegen fließt als Hauptparameter kubisch ein. Das bedeutet, dass – trotz gleichen Werkstoffs – Bauteile mit verschiedenem Durchmesser unterschiedliche Fliehkraftaufweitungen zeigen. Für die Stahl-Stahl-Paarung Spindelwelle und Lagerinnenring wird das bei hohen Drehzahlen und großen Lagerdurchmessern problematisch. Damit der zwingend notwendige Kontakt von Welle und Lager nicht unterbrochen wird, müssen die Lager mit einem Untermaß auf der Welle montiert

werden. Diese Überdeckung muss an die jeweilige Maximaldrehzahl angepasst, die hierbei quadratisch eingeht.

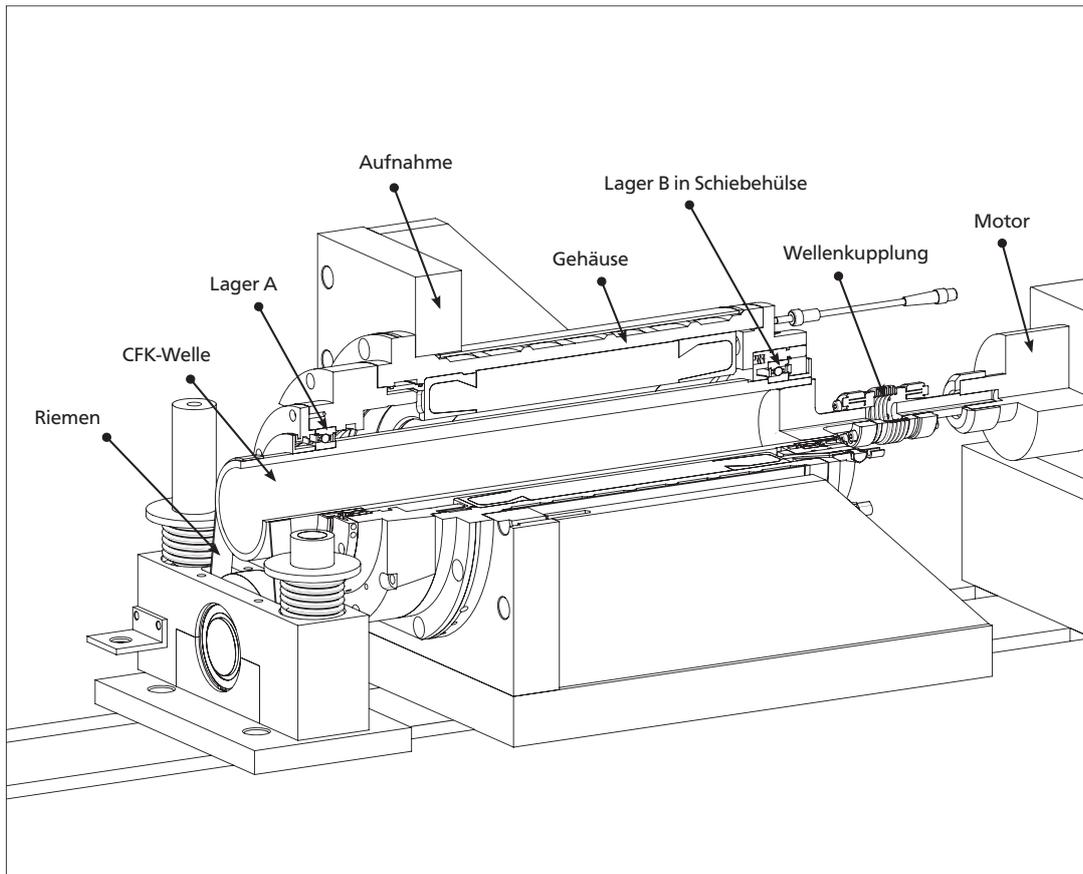
Für ein Lager mit 70 mm Bohrungsdurchmesser liegt die maximal erlaubte Überdeckung bei etwa  $20 \mu\text{m}$ . Ein strengerer Presssitz würde die Lagerkinematik zu sehr beeinträchtigen.

Eine CFK-Welle kennt diese Problematik bei entsprechendem Laminataufbau nicht. Hier lässt sich der tangentielle E-Modul so einstellen, dass die Welle sich im selben Maße aufweitet, wie das Lager. Folglich genügt es, eine geringe Überdeckung zur Spielfreiheit bei der Montage vorzusehen. Für die vorliegende Spindelwelle berechnet sich der erforderliche tangentielle E-Modul zu etwa  $16.000 \text{ N/mm}^2$ . Ein Laminataufbau in dem  $10^\circ$  und  $54^\circ$  Schichten im Verhältnis 6 : 1 verwendet werden, wird dieser Forderung gerecht.

#### Ziel: Lagerung direkt auf CFK

Neben der Bestimmung der Faserorientierungen stellen insbesondere die Krafteinleitungsstellen bei FKV-Bauteilen eine Herausforderung dar. Insgesamt werden an drei Stellen in die Welle Kräfte eingeleitet bzw. übertragen.

- Der unkritischste Krafteinleitungsbereich befindet sich am Rotorpaket. Da dieses direkt mit der Welle verklebt ist, wird das Antriebsmoment groß-



**Abbildung 4**  
Schnittbild des Lagersitz-Prüfstands. Die CFK-Welle ist in einem originalen Motorspindelgehäuse gelagert. Der Antrieb erfolgt extern über einen Elektromotor. Die radiale Last wird über einen Riemen aufgebracht. Die Lagerstelle A ist am höchsten belastet.

flächig übertragen und es sind keine besonderen Probleme zu lösen.

- Die Werkzeugaufnahme stellt, als Bindeglied, das Kräftegleichgewicht zwischen Antriebsmoment und Lagerreaktionen der Welle und Prozesskräften des Werkzeugs her. Hier treten die größten axialen und tangentialen Flächenpressungen auf. Es ist ein Prüfstand in Planung, um zu klären, ob Stahl an dieser Stelle durch eine Kunststofflösung ersetzt werden kann. In ersten Versuchen zur Belastbarkeit von axialen Stirnflächen an CFK-Wellen hat sich gezeigt, dass durch die überwiegend axial orientierten Fasern solche Lasten problemlos aufgenommen werden können.

- Kritisch ist der Bereich um die Lagersitze. Insbesondere unter Biegebelastung (Aufmacherfoto) ist zu befürchten, dass sich die Innenringe der Lager an den Kanten in die vergleichsweise weiche Oberfläche der Welle einarbeiten. In einer aktuell laufenden Prüfstandsuntersuchung (Abbildung 4) wird analysiert, ob Spindellager, die direkt auf einer geschliffenen CFK-Oberfläche fixiert werden, alle

klassischen Anforderungen erfüllen. Bisherige Ergebnisse deuten an, dass eine axiale Vorspannung des Lagers auf der Welle eine größere Herausforderung darstellt, als die Problematik der Lagerkantenpressung.

#### Fertigung präziser Toleranzen

Die aktuelle Spindelwelle wird aus 100CrMo4 mit gehärteten und geschliffenen Oberflächen in engsten Toleranzen von  $<10 \mu\text{m}$  gefertigt. Diese harten und präzisen Oberflächen sind sowohl für die exakte Lagerung als auch eine passgenaue verschleißfeste Werkzeugaufnahme notwendig. Will eine CFK-Lösung hier bestehen, so müssen die gleichen Toleranzanforderungen erfüllt werden. Bereits das präzise Schleifen von Passmaßen in CFK gestaltet sich aufgrund des heterogenen Werkstoffs als sehr anspruchsvoll. Für das Schleifen selbst haben sich ausschließlich Diamant-Schneidstoffe bewährt.

Der gewählte Laminataufbau, der die Welle in Umfangsrichtung sehr nachgiebig macht, verschärft diese Problematik zusätzlich. Die Spannkraften in der Schleifmaschine führen leicht zu Deformationen des Bauteils. In diesem Zustand geschliffen, kommt es zu Maß-Abweichungen nach dem Entspannen. Erste Ergebnisse zeigen, dass es jedoch durchaus möglich ist die geforderten Toleranzen zu erreichen.

# Die Prozesslernfabrik

## – erleben, lernen, forschen

Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion werden an der Technischen Universität Darmstadt im realen Produktionsumfeld der Prozesslernfabrik CiP vermittelt. Durch die praktische Anwendung in dieser Umgebung werden durch Handlungsorientierung nachhaltige Lernerfolge bei Studenten und Industrievertretern erzeugt. Im Rahmen der Forschung dient das CiP als Referenzprozess, der Forschern aus unterschiedlichen Disziplinen die Zusammenarbeit erleichtert. Diskussionen am konkreten Objekt fördern die Kreativität in interdisziplinären Teams, die Erprobung in einer realen Umgebung stellt eine hohe Qualität der Forschungsergebnisse sicher.

### ► The Process Learning Factory – Experience, Learning, Research

*At the Technische Universität Darmstadt methods for optimizing production processes are taught in the realistic production environment of the Process Learning Factory CiP. By applying optimization methods in this environment in an interactive way, students and industry staff are learning sustainably. For research the CiP is a reference process, which brings forward the collaboration especially between different disciplines. Discussions about this practical object advance creativity in interdisciplinary teams, testing in this realistic environment assures a high quality for research results.*

**Eberhard Abele, Felix Brungs** • Die Tür schwingt auf und man tritt in eine Produktionshalle ein. Der Blick fällt auf eine Säge, eine Drehmaschine und mehrere kleine Werkzeugmaschinen. Zwischen diesen Anlagen bewegen sich Studenten und bedienen sie. Man hört die Maschinen arbeiten, wie Werkzeuge verfahren werden und Metall zerspanen. Es riecht nach Kühlschmierstoff. Das ist der erste Eindruck, wenn man die Prozesslernfabrik CiP am Campus Lichtwiese betritt. Im CiP, dem „Center für industrielle Produktivität“, werden Studenten und Industrievertreter mit den Methoden zur Optimierung von Produktionsprozessen vertraut gemacht. Die Besonderheit dabei: Dies geschieht nicht nur in Vorlesungsräumen sondern vor allem im CiP, das eine reale Fabrik darstellt. Es gibt mehrere Werkzeugmaschinen, Qualitätsmessplätze, Montagelinien, Lager und Transportmittel. Hergestellt wird ein Pneumatikzylinder, ein reales Industrieprodukt, das für zahlreiche Zwecke im Maschinenbau eingesetzt wird.

Studenten montieren in der Montagezelle des CiP, ein Mitarbeiter der Logistik entnimmt Material aus dem Puffer.







**Abbildung 1**  
Impressionen der  
Prozesslernfabrik CiP.

Dieses Produktionsumfeld wird genutzt, um theoretisch erlernte Methoden unmittelbar praktisch anzuwenden. In den vergangenen vier Jahren wurden etwa 400 Industrievertreter geschult und etwa 150 Studenten nutzen das CiP pro Semester. Die Möglichkeiten bei der Anwendung der Methoden in dem realen Produktionsumfeld sind dabei vielfältig. „Ich war sehr positiv überrascht, wie erfrischend und inhaltlich wertvoll der theoretische Teil kommuniziert wurde und dass es einen umfassenden Praxisteil gab, bei dem man das zuvor Vermittelte anwenden konnte. An einer TU hätte ich so etwas nicht erwartet.“ Solche Aussagen von Industrievertretern hören die Mitarbeiter des Instituts PTW bei fast jeder Schulung in der Prozesslernfabrik CiP. So können beispielsweise Rüstprozesse an einer realen Werkzeugmaschine beobachtet, analysiert und optimiert werden. Ganze Montagelinien können konzipiert und unter realen Produktionsbedingungen hochgefahren werden. Die Übungsteilnehmer haben dabei die Möglichkeit ihre eigenen Ideen in die Prozessgestaltung einzubringen und können den Erfolg ihrer Maßnahmen unmittelbar testen.

Studenten gelangen in den Vorlesungen „Management industrieller Produktion“, „Werkzeugmaschinen und Industrieroboter“ und „Technologie der Fertigungsverfahren“ in die Prozesslernfabrik. Des Weiteren werden Tutorien und Advanced Design Projects angeboten. In diesen Studienleistungen erhalten Studenten typische Aufgaben eines Produktionsingenieurs und müssen diese im Kontext des CiP lösen. Für Industrievertreter gibt es ein eigenes Curriculum, das innerhalb eines Jahres durchlaufen werden kann.

Die praktische Erfahrung sorgt dafür, dass die Erkenntnisse und das Wissen bei den Schulungsteilnehmern nachhaltig im Gedächtnis haften bleibt. Durch die Praxis werden nämlich erste Fähigkeiten entwickelt, Synapsen im Gehirn erzeugt. Die Anwendung in der realen Praxis fällt so später leichter, was gerade für Universitätsabsolventen ein entscheidender Vorteil ist.

Doch nicht nur die Lehre profitiert von der realen Produktionsumgebung, auch die Forschung gewinnt an Qualität. Lösungen aus der anwendungsnahen Forschung können in einer sehr frühen Phase unter realen Bedingungen getestet werden. Dabei

**Abbildung 2**  
Schulungsteilnehmer bei der  
Rüstzeitanalyse.

#### Handlungsorientiertes Lernen

Neben solchen technischen und organisatorischen Fragestellungen beschäftigen sich die Wissenschaftler in der Prozesslernfabrik aber auch mit didaktischen Konzepten für die Zukunft der Lehre. Da gerade in der Ausbildung zum Maschinenbauingenieur Verständnis für reale Produkte und Prozesse vermittelt werden muss, sind handlungsorientierte Lernformen, wie in der Prozesslernfabrik, unabdingbar. Im Rahmen der Didaktik-Forschung wird ermittelt, welches Wissen und welche Fähigkeiten für den Produktionsingenieur der Zukunft theoretisch, und welche anhand von Praxisübungen vermittelt werden müssen. Die Ausbildung soll auf diese Weise deutlich beschleunigt und gleichzeitig nachhaltig werden. In der Prozesslernfabrik CiP werden dazu Konzepte entwickelt und gemeinsam mit Lernpsychologen erprobt.





**Abbildung 3**  
Demonstrator  
für Sequenz-  
fertigung in der  
Prozesslernfabrik CiP.

lassen sich nicht nur rein technische Auswirkungen untersuchen, sondern auch Folgen für das Personal oder die Organisation eines Produktionsunternehmens.

### Forschung zur Sequenzfertigung

Ein Beispiel hierfür ist die Forschung zur Sequenzfertigung. Im Unterschied zum Einsatz von investitionsintensiven Bearbeitungszentren, die ein komplexes Bauteil komplett bearbeiten können, wird bei der Sequenzfertigung das Ziel verfolgt, mehrere einfache und kostengünstige Maschinen in Sequenz zu schalten. Jede dieser Maschinen

erfüllt nur eine oder wenige bestimmte Bearbeitungsaufgaben und die Bauteile durchlaufen diese Anlagen der Reihe nach. Der Vorteil dieser einfachen, kostengünstigen Maschinen ist ihre höhere Flexibilität. Da einzelne Maschinen schnell ausgetauscht werden können, ist es möglich kurzfristig auf Veränderungen zu reagieren ohne große Investitionen tätigen zu müssen. Das Stückzahlenniveau kann angepasst werden, indem

#### Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Felix Brungs  
Tel. 06151/16-6622  
E-Mail: brungs@ptw.tu-darmstadt.de  
[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)

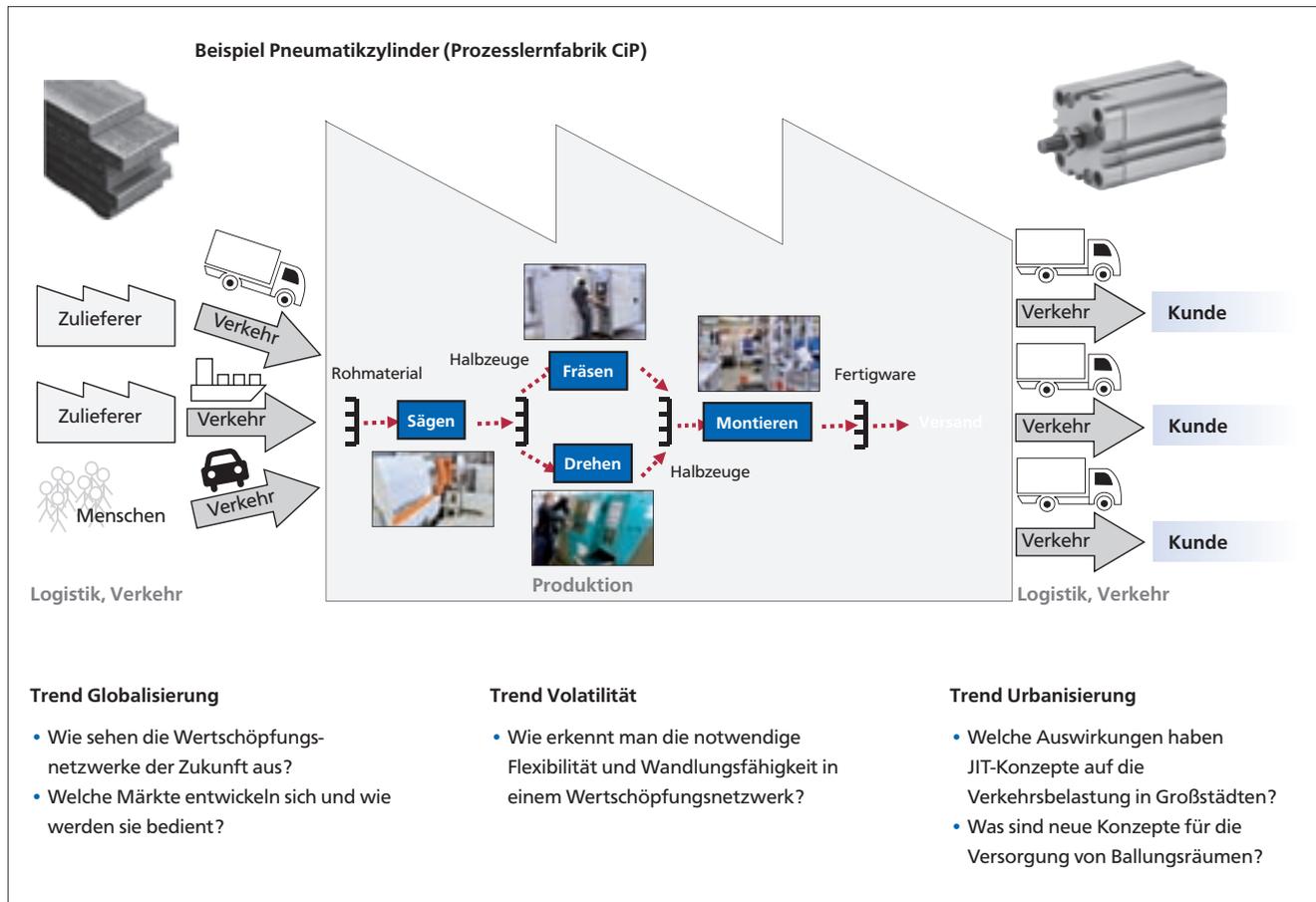
#### CiP – ab 2011 auf europäischer Ebene

Ergebnis dieser Forschungsprojekte ist stets eine konkrete Anwendung in der Prozesslernfabrik, die bei den beteiligten Forschungspartnern aus der Industrie bereits eingesetzt wird. Dieser Ansatz wird ab 2011 auch in einem europäischen Netzwerk aus Universitäten weiterentwickelt. So werden nicht nur hessische, sondern bald auch europäische Studenten und Vertreter aus der Industrie von der Praxisnähe überrascht sein.

der Personaleinsatz variiert wird. Gegebenenfalls können sogar einzelne oder mehrere Maschinen aus dem Betrieb genommen werden, ohne den wirtschaftlichen Erfolg zu gefährden.

Im Rahmen der Forschung am PTW werden dazu die wirtschaftlichen Randbedingungen ermittelt. Insbesondere die Frage, bis zu welchen Losgrößen und ab welcher Variantenzahl sich eine solche Fertigungsorganisation rechnet, beschäftigt die Forscher.

Neben diesen organisatorischen Fragestellungen werden auch technische Lösungen zur Verbesserung der Bauteilqualität erforscht und im CiP erprobt. Denn bei der Bearbeitung auf mehreren Maschinen muss das Bauteil auch mehrfach gespannt werden. In der Folge ergeben sich oft Qualitätsprobleme, insbesondere bei Lagetoleranzen. Es wird untersucht, welche Spanntechnik dieses Problem lösen kann bzw. welche Qualitätsanforde-



rungen mit bestehenden Lösungen in der Sequenzfertigung erfüllt werden können.

### LOEWE-Schwerpunkt Dynamo PLV

Ein weiteres Forschungsprojekt, das auf die Prozesslernfabrik zurückgreift, ist der LOEWE-Schwerpunkt Dynamo PLV. Ziel des Projekts ist die dynamische und nahtlose Integration von Produktion, Logistik und Verkehr. Da bisherige Strategien und Steuerungskonzepte für Produktion und Logistik Verkehrsinformationen nicht berücksichtigen, sollen Lösungen entwickelt werden, die einen reibungslosen Austausch von Daten zwischen Unternehmen, Logistikdienstleistern und Verkehrsämtern gewährleisten. Neben den Planungsprozessen in den Unternehmen, sollen so auch die Maßnahmen der öffentlichen Hand zur Planung und Steuerung der Verkehrsinfrastruktur besser zwischen den Interessengruppen abgestimmt werden. Das CiP dient dabei im Projekt Dynamo PLV als Referenzprozess und Versuchsumgebung. Durch die Anwendung von konkreten Lösungsansätzen in diesem realen Produktionsszenario lassen sich Lösungsideen zum einen einfacher mit den Partnern diskutieren und weiterentwickeln. Es kommt zu einer Verschmelzung der Disziplinen und in der Diskussion unter den Wissenschaftlern ent-

stehen völlig neue Ideen. Zum anderen können Lösungsansätze unter industriellen Bedingungen erprobt und verbessert werden.

Der Nutzen des Referenzprozesses wird auch für die Erforschung der Sequenzfertigung genutzt. An dem bereits im CiP vorhandenen Demonstrator zu diesem Thema, können verschiedene Fallbeispiele und Rahmenbedingungen simuliert werden. In einem Verbundforschungsprojekt werden die Lösungen dann in verschiedenen Industrieunternehmen erprobt und im CiP weiterentwickelt. Im Ergebnis entstehen so allgemeingültige Modelle, Methoden und Lösungen.



**Eberhard Abele** ist seit 2001 Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen im Fachbereich Maschinenbau.



**Felix Brungs** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am PTW und leitet die Forschungsgruppe der Prozesslernfabrik CiP.

### Abbildung 4

Das CiP als Referenzprozess im Rahmen von Dynamo PLV.



# SMS GROUP KARRIERESCHMIEDE IN DEUTSCHLAND

Wir suchen motivierte und talentierte

## Hochschul- absolventen (m/w)

Die SMS group ist mit ihren Unternehmensbereichen SMS Siemag und SMS Meer zukunftsweisend auf dem Gebiet des Anlagen- und Maschinenbaus für die industrielle Verarbeitung von Stahl, Aluminium und NE-Metallen. Das traditionsreiche und international ausgerichtete Familienunternehmen bietet innovative und maßgeschneiderte Lösungen für die metallurgische Prozesstechnik, für Gieß- und Walztechnik sowie für weitere Umformungs- und Veredelungsverfahren. Mit unseren weltweit ca. 9.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern erzielten wir in 2009 einen Umsatz von rund 3,9 Mrd. EUR.

#### **SMS Siemag AG**

Hochschulmarketing  
Anja Müller  
Telefon: +49 (0) 211 881-4433

#### **SMS Meer GmbH**

Personalabteilung  
Peter Schnieders  
Telefon: +49 (0) 2161 350-1370

Die relevanten Fachrichtungen sind:

Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Metallurgie, Umformtechnik, Elektrotechnik/Automatisierungstechnik, Mechatronik, Physik, Informatik, Wirtschaftsingenieurwesen

#### **Unser Angebot**

Wir bieten anspruchsvolle Technologieprojekte im internationalen Umfeld. Mit unseren Ausbildungs- und Förderprogrammen erleichtern wir jungen Technikern und Ingenieuren (m/w) den Einstieg. Wir verschaffen ihnen intensive Einblicke in allen wichtigen Bereichen, fördern ihre individuellen Stärken – und übertragen ihnen schon früh spannende und verantwortungsvolle Aufgaben.

#### **Unsere Erwartung**

Sie haben Ihr Hochschulstudium mit überzeugendem Ergebnis abgeschlossen. Ihre Einsatzbereitschaft, Teamfähigkeit und Belastbarkeit konnten Sie bereits erfolgreich in der Praxis unter Beweis stellen. Sie verfügen über Kommunikationsstärke, Kundenorientierung und Bereitschaft zu Auslandseinsätzen.

**Sie wollen mit uns „Großes bewegen“?**

**Wir freuen uns auf Ihre Online-Bewerbung unter  
<https://jobs.sms-group.com>.**

**Gerne stehen wir Ihnen telefonisch für Fragen zur Verfügung.**

[WWW.GROSSES-BEWEGEN.COM](http://WWW.GROSSES-BEWEGEN.COM)

[WWW.SMS-GROUP.COM](http://WWW.SMS-GROUP.COM)

**SMS  
SIEMAG**

SMS group

**SMS  
MEER**

SMS group

# Integrierte Entscheidung in Produktion, Logistik und Verkehr

Globalisierung, steigende Volatilität und Urbanisierung haben einen zunehmenden Einfluss auf Produktions-, Logistik- und Verkehrssysteme. Um hierauf angemessen reagieren zu können, müssen Unternehmen und die öffentliche Hand abgestimmte Entscheidungen treffen. Um eine angemessene Dynamik und Reaktionsfähigkeit zu erreichen, müssen Rahmenbedingungen der angrenzenden Teilsysteme bekannt, quantifiziert darstellbar und für die Zukunft prognostizierbar sein. Durch eine interdisziplinäre Betrachtung der Teildisziplinen Produktion, Logistik und Verkehr wird Dynamo PLV dazu beitragen, ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem aufzubauen.

## ► *Integrated Decisions in Production, Logistics and Traffic*

*Production, logistics and traffic are more and more effected by globalization, increasing volatility and urban growth. To react appropriate, companies and public authorities have to make coordinated decisions. In this process the basic conditions of the different subsystems have to be known, quantitative describable and predictable for the future. This is necessary to achieve dynamic decisions within a short reaction time. With an interdisciplinary analysis of production, logistics and traffic Dynamo PLV will make a contribution to the development of a decision support system.*

**Hans-Christian Pfohl, Eberhard Abele, Manfred Boltze, Felix Brungs und Christian Zuber** • Das Hemd aus China, der Pullover aus Bangladesch und die Hose aus Malaysia – viele von uns tragen ein solch globales Outfit. Doch nicht nur die Kleidung wird heute an vielen verschiedenen Standorten produziert, auch Autos oder Flugzeuge werden – selbst wenn es von einem deutschen Hersteller ist – nur zu einem kleinen Teil in Deutschland gefertigt. Die Wertschöpfungsnetzwerke solcher Produkte spannen sich oftmals genauso um den Globus, wie auch die Absatzmärkte.

Für die Unternehmen ist die Konsequenz, dass sie ein komplexes Netzwerk aus Lieferanten und Untertierlieferanten, aus weltweit verteilten Produktionsstätten und Absatzmärkten beherrschen müssen. Rohmaterial wird mit dem Schiff aus Südamerika



nach China transportiert, Flugzeuge fliegen teure Steuergeräte aus der Ukraine nach Deutschland, Bauteile kommen mit dem LKW aus Spanien, und alles muss pünktlich ankommen, damit die Produktion nicht still steht und hohe Kosten entstehen. Um dieses Zusammenspiel aus Produktion, Logistik und Verkehr zu beherrschen, werden heute kom-

### Weitere Informationen

[www.dynamo-plv.de](http://www.dynamo-plv.de)  
oder sprechen Sie uns gerne direkt an.



Die Anforderungen an Produktions-, Logistik- und Verkehrssysteme werden immer komplexer. Nur eine integrierte Betrachtung der Systeme wird zu nachhaltigen Lösungen für Wirtschaft, öffentliche Hand und Gesellschaft führen.

plexe Planungs- und Steuerungssysteme eingesetzt, die mit entsprechenden Optimierungsalgorithmen arbeiten. Auch die öffentliche Hand hat auf die höheren Anforderungen aus Produktion und Logistik reagiert: Standstreifen auf Autobahnen werden bei hoher Verkehrsbelastung freigegeben, Raststätten zeigen an, wie viele Stell-

plätze für LKW noch frei sind, und Verkehrsleitsysteme passen die Geschwindigkeitsbegrenzung an die Verkehrslage an. An vielen Stellen – wie zum Beispiel bei lärm- oder feinstaubbedingten Durchfahrverboten für LKW oder bei der Transportmittelwahl in Unternehmen – ist aber bisher noch zu wenig Abstimmung zwischen öffentlicher Hand und



**Abbildung 1**  
**Das globale Auto, ein koreanisches Produkt.**  
 Design in Italien, Motorentwicklung mit Beteiligung österreichischer Ingenieurdienstleister, Werkzeugmaschinen aus Deutschland, Motoren gefertigt in Japan mit Zulieferkomponenten aus China, Elektronik entwickelt in Silicon Valley, gefertigt in Taiwan.

den Unternehmen festzustellen. Dabei entstehen teilweise unnötige Nachteile in Produktion und Logistik, und Verkehrsnetze stoßen an ihre Grenzen: Staus auf den Autobahnen oder überfüllte Rastplätze sind für viele von uns mittlerweile ein vertrautes Bild.

Hier setzt das Projekt Dynamo PLV an. Ziel ist es, Unternehmen und öffentliche Hand bei ihren Entscheidungen so zu unterstützen, dass sowohl die Interessen der Unternehmen als auch die der öffentlichen Hand möglichst gut erfüllt werden.

Unternehmen wollen ihre Zulieferkomponenten heute „Just-in-time“ geliefert haben, sodass das be-

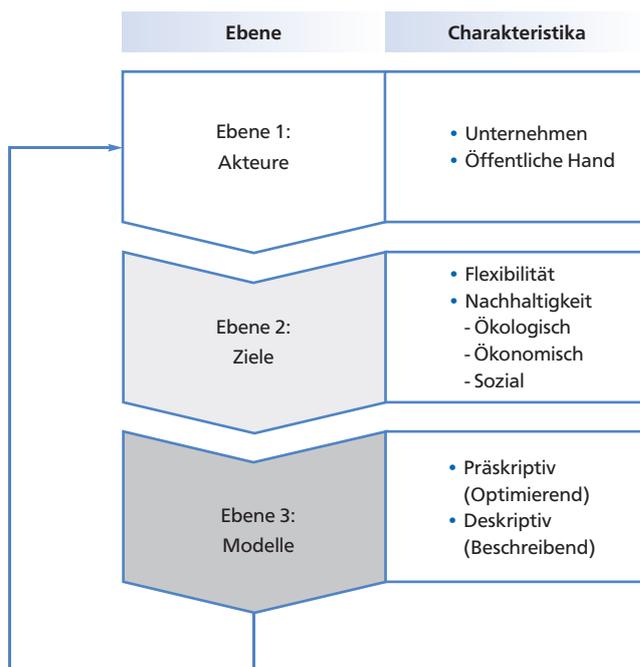
nötigte Material erst im letzten Moment für die Produktion angeliefert wird. Nur so ist die vom Kunden geforderte Flexibilität und hohe Variantenvielfalt möglich. Das funktioniert nur, wenn die Transporte wie erwartet durchgeführt werden können und keine Verzögerungen durch Behinderungen auf Straße oder Schiene auftreten. Der öffentlichen Hand würde es helfen, wenn Sie wüsste, wie stark Unternehmen durch Streckensperrungen, Baustellen oder Durchfahrverbote betroffen sind und wie sie darauf reagieren.

**Integrierte Betrachtung von Akteuren, Zielen und Modellen**

Mit dem durch die Exzellenzinitiative des Landes Hessen (LOEWE) geförderte Projekt Dynamo PLV möchten die Technische Universität Darmstadt und die European Business School die Grundlage für eine dynamische Verknüpfung von Produktion, Logistik und Verkehr schaffen. Dazu wird auf drei Ebenen agiert:

Auf der ersten Ebene wird das Zusammenspiel der Akteure analysiert: Unter welchen Bedingungen treffen Unternehmen und die öffentliche Hand ihre Entscheidungen und wie weit beeinflussen sie sich gegenseitig? Eine wichtige Rolle nimmt hierbei der Konsument als Verursacher vieler Entscheidungen der Akteure in Produktion, Logistik und Verkehr, bspw. durch Konsumschwankungen, ein.

Auf der zweiten Ebene werden die Zielsysteme betrachtet. Die zunehmende Notwendigkeit von umweltbedingten Restriktionen im Verkehr einerseits sowie von Flexibilisierung und nachhaltigem Wirtschaften andererseits sind in Einklang zu bringen. Wie wichtig die zunehmende Flexibilisierung ist, lässt sich nicht nur anhand kürzerer Produktlebenszyklen, demographischem Wandel, Urbanisierung, Globalisierung und gesteigener Volatilität erkennen, sondern auch an der vergangenen Wirtschafts- und Finanzkrise. Oftmals



**Abbildung 2**  
 Die drei Untersuchungsebenen von Dynamo PLV.

# Wie viele Möglichkeiten kann ein einziges Unternehmen eigentlich bieten?



Bei Siemens Energy finden Sie eine enorme Auswahl und unendliche Perspektiven, um Energie nachhaltig nutzbar zu machen.

Es gibt kaum ein anderes Unternehmen, das so viele Möglichkeiten bietet, die unterschiedlichsten Formen von Energie nutzbar zu machen. Kein Grund zur Sorge also, hier müssen Sie sich nicht von Anfang an festlegen. Bei Siemens Energy bieten wir hellen Köpfen den Raum für Entwicklung und die Vielfalt, die sie brauchen um zu begeistern und begeistert zu werden. Für Sie bedeutet Siemens Energy eine Karriere mit einzigartigen Möglichkeiten und unendlich viel Potential.  
[www.siemens.com/energy](http://www.siemens.com/energy)

Answers for energy.

**SIEMENS**



steht nicht mehr der Ertrag oder die Qualität der Produkte an erster Stelle der Unternehmensziele, sondern die Möglichkeit, flexibel auf Veränderungen in der Umwelt der Wertschöpfungskette (begonnen beim Global Sourcing über die Produktion bis hin zur strategischen und operativen Distribution) zu reagieren.

Wesentliche Treiber sind dabei die verschiedenen ökonomischen, ökologischen und sozialen Ziele, die im Sinne einer umfassenden Nachhaltigkeit

angestrebt werden. Das Projekt Stuttgart 21 oder der Ausbau des Frankfurter Flughafens haben die vielfältigen Zielkonflikte und Abhängigkeiten von Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft/Politik eindrucksvoll aufgezeigt.

Auf der dritten Ebene werden im Projekt Dynamo PLV Modelle zur Entscheidungsunterstützung betrachtet. Die Herausforderung hierbei liegt in der Heterogenität der Modellarten, die in den einzelnen Teildisziplinen eingesetzt werden. Modelle zur Steuerung des Verkehrsflusses lassen sich bisher nicht mit jenen der Produktionsprozesssteuerung oder der Lagerhaltung in Bezug setzen. Dies liegt sowohl an Konzeption und Aufbau der Modelle, als auch an den nicht hinreichend bekannten und definierten Schnittstellen. Unabhängig von der Modellgestaltung muss zudem die Rolle der Intuition bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden, verlassen sich doch viele Entscheider eher hierauf, als auf Modellergebnisse und Berechnungen.

#### Aus Schnittstellen werden Nahtstellen

Um das Zusammenspiel und die Abhängigkeiten innerhalb und zwischen diesen drei Ebenen beherrschbar zu machen, werden im ersten Schritt in den Teildisziplinen Typologien bezüglich handelnder Akteure, gemeinsamer Einflussfaktoren sowie der eingesetzten Modelle gebildet. Durch den Abgleich der Typologien im zweiten Schritt werden jene Schnittstellen sichtbar, an denen sich interdisziplinär kausale Wirkzusammenhänge beschreiben lassen. Diese dienen in einem dritten Schritt als Basis zur Erarbeitung angepasster Modelle für die dezentrale Entscheidungsfindung.

Dabei bedarf es eines Informationssystems, welches im Projekt Dynamo PLV auf Metadaten aus den Modellbetrachtungen basiert. Klassische Datenbanksysteme sind durch das hohe Datenaufkommen einer Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung interdisziplinärer Einflussfaktoren den Anforderungen nicht gewachsen oder nicht

**Abbildung 3**  
Dynamo PLV:  
Integrierte  
Betrachtung bislang  
separierter Systeme.



**Hans-Christian Pfohl** ist seit 1982 Leiter des Fachgebietes Unternehmensführung & Logistik an der TU Darmstadt und stellvertretender Sprecher des Projekts Dynamo PLV.



**Eberhard Abele** ist Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der TU Darmstadt und Sprecher des Projekts Dynamo PLV.



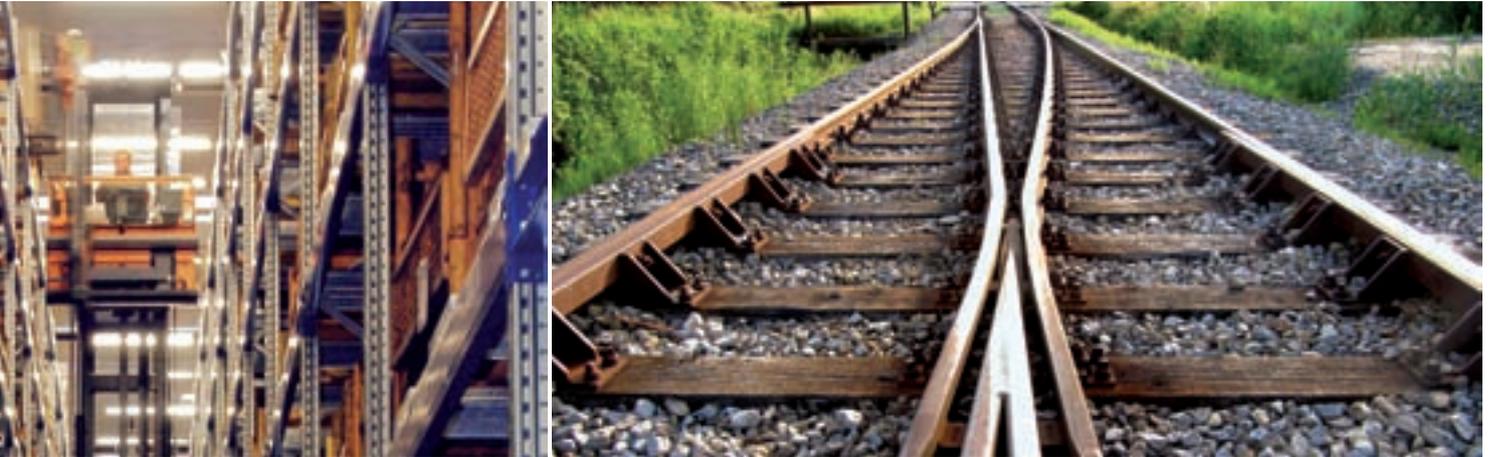
**Manfred Boltze** ist Leiter des Fachgebietes Verkehrsplanung und Verkehrstechnik an der TU Darmstadt und hat bei Dynamo PLV die Funktion des Sprechers für den Bereich Verkehr übernommen.



**Felix Brungs** ist Doktorand am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt. Zudem ist er Leiter der Prozesslernfabrik CIP.



**Christian Zuber** ist Doktorand am Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik der TU Darmstadt und Leiter der Geschäftsstelle von Dynamo PLV sowie Leiter der Geschäftsstelle Logistik RheinMain Darmstadt.



benutzerfreundlich. Mit einem Event-Warehouse-System, welches die relevanten Informationen am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, den richtigen Personen zur Verfügung stellt, soll auch dieses Problem gelöst werden.

Durch die Einrichtung dreier Professuren für Intralogistik und Produktionsmanagement, Wirtschaftsverkehr und Global Sourcing wird dem Projekt Dynamo PLV strukturell langfristig Rechnung getragen.

Gemeinsam arbeiten wir an einer Lösung, um künftig schneller, flexibler und effizienter auf die Belange von Menschen, Unternehmen und Öffentlichkeit mit Hilfe von Produktion, Logistik und Verkehr reagieren zu können.

#### Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik

Hans-Christian Pfohl  
Tel. 06151/16-5423  
E-Mail: pfohl@bwl.tu-darmstadt.de  
[www.fgul.de](http://www.fgul.de)

#### Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Eberhard Abele  
Tel. 06151/16-2156  
E-Mail: abele@ptw.tu-darmstadt.de  
[www.ptw.tu-darmstadt.de](http://www.ptw.tu-darmstadt.de)

#### Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Manfred Boltze  
Tel. 06151/16-2025  
E-Mail: boltze@verkehr.tu-darmstadt.de  
[www.verkehr.tu-darmstadt.de](http://www.verkehr.tu-darmstadt.de)

#### Institut für Produktionstechnik, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Felix Brungs  
Tel. 06151/16-6622  
E-Mail: brungs@ptw.tu-darmstadt.de  
[www.prozesslernfabrik.de](http://www.prozesslernfabrik.de)

#### Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik

Christian Zuber  
Tel. 06151/16-4263  
E-Mail: zuber@dynamo-plv.de  
[www.dynamo-plv.de](http://www.dynamo-plv.de)

#### Beteiligte Professoren

- Eberhard Abele (Flexible Produktion, TU Darmstadt, Sprecher)
- Manfred Boltze (Güterverkehr, TU Darmstadt)
- Alejandro Buchmann (Informationstechnologie, TU Darmstadt)
- Ralf Elbert (Strategische Distribution, TU Darmstadt)
- Herbert Meyr (Demand Fulfillment, TU Darmstadt)
- Andreas Oetting (Güterverkehr, TU Darmstadt)
- Hans-Christian Pfohl (Entscheidungsprozesse, TU Darmstadt, stv. Sprecher)
- Richard Pibernik (Global Sourcing, Demand Fulfillment, European Business School)

—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

## Inserentenverzeichnis

<b>Adaptronic Congress</b> www.adaptronic-congress.com	Seite 24	<b>SCHENCK RoTec GmbH</b> www.schenck-rotec.de	Seite 29
<b>European Space Agency (ESA)</b> www.esa.int/careers	Seite 55	<b>SEW-EURODRIVE GmbH&amp;Co.KG</b> www.karriere.sew-eurodrive.de	Seite 13
<b>KNF Neuberger GmbH</b> www.knf.de	Seite 85	<b>Siemens AG Energy Sector, Erlangen</b> www.siemens.com/energy	Seite 83
<b>KSB Aktiengesellschaft</b> www.ksb.com	Seite U3	<b>Siemens AG, Frankfurt</b> www.siemens.com/careers	Seite 19
<b>MAINOVA AG</b> www.mainova-karriere.de	Seite 6	<b>SMS Siemag AG</b> www.sms-group.com	Seite 79
<b>Merck KGa</b> www.come2merck.de	Seite U4	<b>Software AG</b> www.softwareag.com	Seite 63
<b>NewTec GmbH</b> www.newtec.de	Seite 25	<b>Wachendorff Elektronik</b> www.wachendorff-elektronik.de	Seite 53
<b>PWT Wasser- und Abwassertechnik</b> www.pwt.de	Seite 37	<b>Wissenschafts- und Kongresszentrum</b> www.darmstadtium.de	Seite 17
<b>Rhode &amp; Schwarz</b> www.career.rohde-schwarz.com	Seite U2		

## Bildnachweise

Titelfoto: Institut PTW TU Darmstadt/Robert Götzfried, Aufmacherfotos (10) und Inhaltsverzeichnis (6): Katrin Binner, S. 10 bis 12: DIK, TU Darmstadt, SFB666, S. 16 bis 18: Institut IMS TU Darmstadt (3), S. 21 bis 23: Fraunhofer Transferzentrum Adaptronik (3), LOEWE Zentrum Adria (2), S. 27 bis 32: micromotion GmbH, Mainz, EMK, TU Darmstadt, S. 34 bis 36: Fachgebiet NAW TU Darmstadt (4), Gießereitechn. Inst. Leoben, Institut PtU TU Darmstadt, S. 38 bis 42: Institute PtU und PTW TU Darmstadt (2), Institut PtU TU Darmstadt, Institut PtU, Forschungsgebiet Optimierung TU Darmstadt, Fachgebiet PhM TU Darmstadt, Institut PtU/Fachgebiet KGBauKo TU Darmstadt, S. 46 bis 48: Institut PTW TU Darmstadt (5), S. 50 bis 51: heimwerker.de, Center of Smart Interfaces TU Darmstadt (4), S. 52: William Thielicke, S. 58 bis 63: Microsoft(3), wikipedia, Voith Turbo/Theodoriana, Institut FST TU Darmstadt (5), ETH-Bibliothek Zürich/Bildarchiv/Institut FST TU Darmstadt, S. 66 bis 67: Institut PTW TU Darmstadt (2), S. 70 bis 73: Institut PTW TU Darmstadt/VDW, Institut PTW TU Darmstadt, Franz Kessler GmbH, Fachgebiet KLuB TU Darmstadt, S. 74 bis 78: Institut PTW TU Darmstadt (5), S. 80 bis 84: DB AB/Petra Schwaiger, Institut PTW TU Darmstadt, Projekt Dynamo plv TU Darmstadt, Pixelio, Harry Hautumm, Rainer Sturm, Marcus Walter

## Impressum forschen 1/2011

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

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

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

Ohne die Pumpen, Armaturen und Systeme von KSB könnten unsere rund 14.500 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](http://www.ksb.com)

*Tobias Konrad,*  
Trainee



*Diana Höning,*  
Unternehmens-  
kommunikation

## Interessant:

Ein 75 kg schwerer Astronaut benötigt etwa 15l Sauerstoff pro Stunde – eine beschwerdefreie Atmung vorausgesetzt.



## Relevant:

Nasivin gehörte 1969 offiziell zur Apollo 11 Bordapotheke und sorgte bei Neil Armstrong und Buzz Aldrin für eine freie Nase.

Es gibt noch viel an uns zu entdecken. Jetzt bewerben und die Zukunft mitgestalten.

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