



Hochschule Karlsruhe  
Technik und Wirtschaft  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Näher dran.



# Forschung aktuell 2017

ISSN 1613-4958

# DISCOVER NEW DIMENSIONS

Begeisterte Detektivin mit Diplomatie. Ihre Fälle löst Ida vorwiegend im Testing Umfeld. Inmitten eines jeden neuen Bug-Rätsels: ein unglaubliches Netzwerk an Wissen und humorvolle Ermittlerkollegen im Team.

Ida, Test Engineer, Shared Services

**Täglich Abwechslung gefällig und gleichzeitiger Konstanz?**

Herzlich willkommen bei Daimler TSS, dem IT-Spezialisten der Daimler AG. Wir haben z.B. car2go groß gemacht - zusammen mit begeisterten & kompetenten Menschen wie Dir!

[discover.daimler-tss.com](https://discover.daimler-tss.com)



Liebe Leserinnen und Leser,

an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft haben sich die Forschungsaktivitäten und -leistungen in den letzten Jahren deutlich gesteigert. Sie gehört zu den forschungsstärksten Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAWs) in Baden-Württemberg und Deutschland: Gerade erst erhielt Frau Prof. Dr. Britta Nestler, seit 2001 Professorin an der Hochschule Karlsruhe und seit 2009 auch am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2017 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). In der Geschichte des Leibniz-Preises ist Frau Prof. Dr. Nestler deutschlandweit die erste Preisträgerin überhaupt, die an einer HAW forscht und lehrt. Der mit 2,5 Millionen Euro höchstdotierte Wissenschaftspreis Deutschlands wird Frau Britta Nestler für ihre maßgeblichen international anerkannten Forschungsarbeiten in der computergestützten Materialforschung verliehen.

Die Stärkung der Forschung ist ein strategisches Ziel der Hochschule Karlsruhe und aufgrund des enormen Entwicklungspotenzials dieses Bereichs sowie dem immer stärker werdenden Wettbewerb zwischen den Hochschulen hat die Hochschule Karlsruhe eine Neuordnung der Forschungsstrukturen und -organisation eingeleitet. Diese geht in Richtung einer qualitätsgesicherten Institutsstruktur verbunden mit einer Reorganisation der betreuten zentralen Einrichtungen an der Hochschule. Ziel ist die Erhöhung der Forschungsleistungen allgemein und speziell im Hinblick auf die Erlangung eines Promotionsrechts für die HAWs in Baden-Württemberg.

Das größte Entwicklungspotenzial der HAWs in Deutschland liegt im Bereich der Forschung. Dies lässt sich zum einen an den hierfür ein-

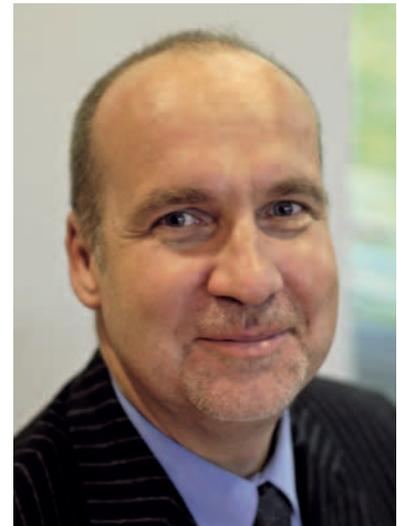
geworbenen Drittmitteln der HAWs ablesen, vor allem auch im Vergleich zu einer eher stagnierenden Grundfinanzierung. Zum anderen zeigt sich dieses Potenzial in den Transferaktivitäten durch die angewandte Forschung und der regionalen Verankerung der HAWs in der meist mittelständisch geprägten regionalen Wirtschaft. Aufgrund des demografischen Wandels werden die Studierendenzahlen langfristig stagnieren, weshalb die Hochschule Karlsruhe Studieninteressierte durch eine besondere Studienqualität überzeugt und durch ihre Forschungsaktivitäten als Lieferant aktueller Themen für die Lehre, für herausragende Abschlussarbeiten und interdisziplinäre Projekte einen wichtigen Beitrag leistet.

Speziell in Baden-Württemberg ist die Ermittlung des Flächenbedarfs der HAWs reformiert worden, weswegen zukünftig insbesondere mit Flächen für die Forschung zu rechnen ist.

In der aktuellen Ausgabe unseres jährlich erscheinenden Forschungsberichts möchten wir Ihnen in gewohnter Weise einen Einblick in die vielfältigen Forschungsaktivitäten und -projekte der Hochschule geben. Schwerpunkte dieser Ausgabe sind die Themen:

- Informatik/Wirtschaftsinformatik
- Energieeffizienz/Mobilität/Intelligente Systeme
- Maschinenbau
- Wirtschaftswissenschaften

Die Rubrik „Schlaglichter“ stellt Ihnen weitere hochaktuelle Forschungsprojekte der Hochschule Karlsruhe vor. Mein Dank gilt auch in diesem Jahr allen Kolleginnen und Kollegen, die ihre Ergebnisse in diesem Bericht veröffentlichen. Vielen Dank auch all denen, die re-



daktionell und organisatorisch an der Publikation dieses Forschungsberichts mitgewirkt haben.

Ihnen als Leserinnen und Lesern wünsche ich bei der Lektüre interessante Einblicke in die Forschungsaktivitäten der Hochschule Karlsruhe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Stöckner', written in a cursive style.

Prof. Dr. Markus Stöckner  
Prorektor für Forschung, Technologietransfer, Kooperationen, Qualitätsmanagement, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

# Impressum

ISSN 1613-4958

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.  
Forschung aktuell 2017

## Herausgeber

Rektorat der Hochschule Karlsruhe –  
Technik und Wirtschaft

## Redaktion

Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner  
Prorektor der Hochschule Karlsruhe

Hendrik Hunsinger  
Geschäftsstelle für Öffentlichkeitsarbeit und  
Marketing der Hochschule Karlsruhe  
Wissenschaftsredaktion  
Hendrik.Hunsinger@hs-karlsruhe.de

## Layout

Alfons Muntean  
Geschäftsstelle für Öffentlichkeitsarbeit  
und Marketing

## Grafik

Erwin Fieber

Alfons Muntean  
Geschäftsstelle für Öffentlichkeitsarbeit  
und Marketing der Hochschule Karlsruhe

Titelbilder: Tobias Schwerdt (Foto rechts);  
generierter Grünkörper zur Simulation des Sinter-  
prozesses, Institute of Materials and Processes der  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
(Abb. links)

## Englisch-Lektorat

Lynn Beechey-Volz  
Institut für Fremdsprachen der  
Hochschule Karlsruhe

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren  
verantwortlich.

## Satz, Anzeigen und Verlag

VMK Verlag für Marketing und  
Kommunikation GmbH & Co. KG  
Faberstraße 17, 67590 Monsheim  
Telefon: 06243/909-0, Telefax: 06243/909-400  
E-Mail: info@vmk-verlag.de  
www.vmk-verlag.de

Auflage: 3000 Stück, März 2017

## Druck

VMK-Druckerei GmbH  
Faberstraße 17, 67590 Monsheim  
Telefon: 06243/909-110, Telefax: 06243/909-100  
E-Mail: info@vmk-druckerei.de

**BOSCH**  
Technik fürs Leben

Think  
IoT  
Smart  
e-Mobility  
Sustainability

Lieber Taten statt Visionen?  
Verbessern Sie mit uns Lebensqualität.

[www.start-a-remarkable-career.de](http://www.start-a-remarkable-career.de)

Willkommen bei Bosch. Hier bewegen Sie Großes. Ob im Bereich Mobility Solutions, Industrial Technology, Consumer Goods oder Energy and Building Technology, Bosch trägt durch nutzbringende Lösungen und Produkte entscheidend dazu bei, die Lebensqualität heutiger und künftiger Generationen zu verbessern. Das gelingt nur mit einem globalen Netzwerk von über 375.000 hoch engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die vordenken und täglich fachliches Neuland betreten. **Starten auch Sie etwas Großes.**

Let's be remarkable.

# Inhalt

Stand der Forschung an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft <i>Markus Stöckner und Elena Stamm</i>	6
--	---

## Informatik / Wirtschaftsinformatik

Phasenfeldsimulationen zur Mikrostrukturentwicklung während des Sinterprozesses <i>Johannes Hötzer, Michael Kellner, Veronika Rehn, Marco Seiz und Britta Nestler</i>	8
Simulation der martensitischen Transformation in polykristallinen Gefügen mit der Phasenfeldmethode <i>Ephraim Schoof, Nick Streichhan, Daniel Schneider, Michael Selzer und Britta Nestler</i>	13
Lösung von Task Scheduling- und Optimierungsproblemen durch schwarmintelligente Neuroagenten <i>Stefan Paschek, Christoph Fuchs, Patrick Sauter, Thomas Barteit, Peter Huber und Hans-Werner Dorschner</i>	17
Digitalisierungskompetenz im deutschen Maschinen- und Anlagenbau <i>Steffen Kinkel</i>	20

## Energieeffizienz / Mobilität / Intelligente Systeme

Characterization of the mechanical behavior of laminated foils used to form blister Packages <i>Simon Müller, Marius Huff, Jörg-Uwe Bippus and Sabine M. Weygand</i>	23
Prädiktive Reichweitenberechnung – Modellierung des Energiebedarfs einer PKW-Klimatisierung <i>Kurt Kruppok, Felix Claret und Reiner Kriesten</i>	26
aFAS - Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen <i>Christian Holldorb, Tim Reuber und Jan Wachsmann</i>	29
Entwicklung eines gemischansaugenden magerbetriebenen Erdgasmotors zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte unter Verwendung numerischer und experimenteller Methoden <i>Jürgen Bauer, Waldemar Rieb, Stefan Fieg, Denis Neher und Maurice Kettner</i>	33
Dynamische Companion-Technologien und mobile Systeme im öffentlichen Verkehr <i>Regina Schindwein, Christine Keller und Thomas Schlegel</i>	39
Software und Methoden zur optimierungsbasierten Regelung nachhaltiger Energiesysteme <i>Adrian Bürger, Angelika Altmann-Dieses, Moritz Diehl und Marco Braun</i>	43

# Inhalt

## Maschinenbau

- OptiSorp: Steigerung der Leistungsdichte von Adsorber Compounds für mobile und stationäre Adsorptionswärmepumpen 47  
*Oliver Kraft und Matthias Stripf*
- Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der Bearbeitung von Nickelbasis-Superlegierungen mit vollkeramischen Fräswerkzeugen 52  
*Jürgen Sauer, Malte Blum und Rüdiger Haas*
- Fließkurven von 30 Stählen als Grundlage für eine neue Datenbank 57  
*Simon Schmidt und Rainer Schwab*
- Akustische Bestimmung des Restitutionskoeffizienten einer Kugel im freien Fall 61  
*Christof Krülle*
- Knallgas reloaded: Wie verläuft der Übergang zwischen Deflagration und Detonation? 65  
*Heiko May und Jens Denecke*

## Wirtschaftswissenschaften

- Inequality in Germany and the United States: Trends, Policies and Macroeconomic Implications 69  
*Hagen Krämer*
- Eigenfertigung verschafft Gewinn- und Produktivitätspotenziale 72  
*Steffen Kinkel*
- Identification of Factors influencing the Acceptance of Wearables 75  
*Lena Gribel, Stefanie Regier and Ingo Stengel*

## Schlaglichter

- Nanostrukturierte, funktionelle Membranen zur Wasserreinigung 79  
*Ephraim Gukelberger, Stefan Schmidt und Jan Hoinkis*
- Kalibrierung einer plenoptischen Kamera zur Navigation und 3D-Datenerfassung 82  
*Niclas Zeller und Franz Quint*
- Membran-basierte Polymer-Lichtwellenleiter für miniaturisierte optofluidische Sensoren 87  
*Christoph Prokop und Christian Karnutsch*
- Elektrochemische Detektion von militärischen Altlasten 90  
*Peter Rabenecker und Karsten Pinkwart*
- Mehrsprachigkeit im interkulturellen Behördenhandeln – Herausforderungen und Lösungen in Form von virtuellem Dolmetschen. Das Projekt Virtueller Dolmetscherpool (VIP) 94  
*Andrea Cnyrim*




**Kaufland**

*Gemeinsam  
erfolgreich*

**Jetzt durchstarten!**

**Praktikum, Abschlussarbeit, Traineeprogramm, Entwicklungsprogramm Marktleiter sowie Direkt-  
einstieg: Ihr idealer Einstieg bei Kaufland!**

Wir sind ein sehr erfolgreiches internationales Handelsunternehmen – leistungsstark, dynamisch und fair. Unser Team setzt auf Motivation und Engagement von jedem Einzelnen. Wir bieten Chancen, Erfolge und Zukunft.

Werden auch Sie Teil unseres Teams.

Jetzt informieren und bewerben:  
[www.kaufland.de/studenten](http://www.kaufland.de/studenten)



**PIONEERING  
UNDERGROUND  
TOGETHER**

**Ingenieure und Ingenieurinnen bei Herrenknecht** wirken tatkräftig an bahnbrechenden Infrastrukturprojekten mit, die mit unserer einzigartigen Tunnelvortriebstechnik weltweit gebaut werden. Sie sind in einem spannenden und abwechslungsreichen Umfeld die Garanten für den Projekterfolg unserer Auftraggeber. Auf junge wie erfahrene Ingenieure warten bei Herrenknecht tagtäglich neue Herausforderungen und es bieten sich echte Entwicklungspotentiale. Werden Sie Teil eines schlagkräftigen Teams technikbegeisterter Pioniere in einem vielversprechenden Zukunftsmarkt.

Bewerben Sie sich unter [www.herrenknecht.com/karriere](http://www.herrenknecht.com/karriere)



# Stand der Forschung an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Um ihre Spitzenposition als eine der forschungstärksten Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAWs) in Baden-Württemberg und Deutschland auch in Zukunft zu sichern, stellt der weitere Ausbau der angewandten Forschung ein strategisches Ziel zur Profilbildung der Hochschule Karlsruhe – Wirtschaft und Technik dar. Anwendungsorientierte Forschung ergänzt gewinnbringend den primären Auftrag der Hochschule: die wissenschaftliche Ausbildung der Studierenden. Durch die hochaktuellen Forschungstätigkeiten an der Hochschule Karlsruhe und den daraus resultierenden Angeboten an Studienprojekten werden Lehre und Studium enorm bereichert. Aufgrund der Anwendungsorientierung sind die Forschungsergebnisse der Hochschule Karlsruhe besonders für Industrie und Wirtschaft interessant.

Die immer umfangreicheren Forschungsaktivitäten der Hochschule Karlsruhe werden aktuell noch in zwei zentralen Forschungseinrichtungen gebündelt – dem Institut für Angewandte Forschung (IAF) und dem Institute of Materials and Processes (IMP). Während das IAF als zentrale anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungseinrichtung allen Forschenden offen steht, konzentriert sich das 2009 gegründete IMP thematisch auf die Entwicklung neuer Modellierungs- und Simulationstechniken. Neben diesen beiden zentralen Instituten bestehen weitere dezentrale Forschungseinrichtungen. Beispiele hierfür sind das Institut für Grund- und Straßenbau (IGS) an der Fakultät für Architektur und Bauwesen und das Institut für Ubiquitäre Mobilitätssysteme (IUMS) an der Fakultät für Informationsmanagement und Medien. Um die Forschungsleistungen der Hochschule zu stärken und die Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen, soll die Forschungsstruktur 2017 in Richtung einer qualitätsgesicherten Institutsstruktur neuorganisiert werden. Die Forschungsstärke der Hochschule Karlsruhe spiegelt sich auch in ihrem Drittmittel-, Promotions- und Publikationsaufkommen wider.

## 1. Drittmittelaufkommen

Die Drittmittelaufnahmen der Hochschule Karlsruhe in der Forschung beliefen sich in 2016 auf insgesamt ca. 8,6 Mio. Euro. Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, haben sich die Drittmittelaufnahmen der Hochschule im betrachteten Zeitraum und insbesondere von 2015 auf 2016 mit einem Wachstum von 63,6 % deutlich gesteigert. Die Steigerung in 2016 ist neben einer all-

gemeinen Verbesserung auf den Beginn eines großen EU-Projektes unter Leitung der Hochschule Karlsruhe zurückzuführen. Mit Ausnahme der Jahre 2012 und 2015 war die Hochschule Karlsruhe jeweils die drittmittelstärkste HAW in Baden-Württemberg. Aktuell arbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Hochschule Karlsruhe an rund 168 Forschungsprojekten.

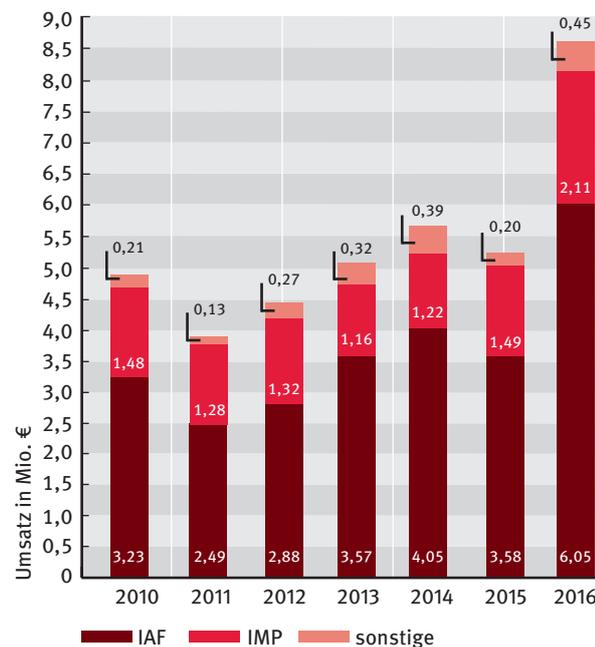


Abb. 1: Umsatzentwicklung IAF, IMP und sonstige von 2010 bis 2016

## 2. Promotionsaufkommen

Insgesamt 73 laufende Promotionsverfahren wurden Ende 2016 kooperativ in Form einer Individual- oder einer strukturierten Promotion an der Hochschule Karlsruhe betreut und 10 Doktoranden schlossen ihre Promotion 2016 ab. Zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) werden strukturierte Promotionsvorhaben im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkollegs und des vom Land Baden-Württemberg unterstützten kooperativen Promotionskollegs durchgeführt. Es ist zukünftig mit einem Anstieg der Promotionszahlen an der Hochschule Karlsruhe zu rechnen, da dies einerseits die Entwicklung der letzten Jahre nahelegt (s. Abb. 2) und andererseits die Landesregierung von Baden-Württemberg ein Maßnahmenpaket zur Förderung von Promotionen in Kooperation mit HAWs ausgeschrieben hat.

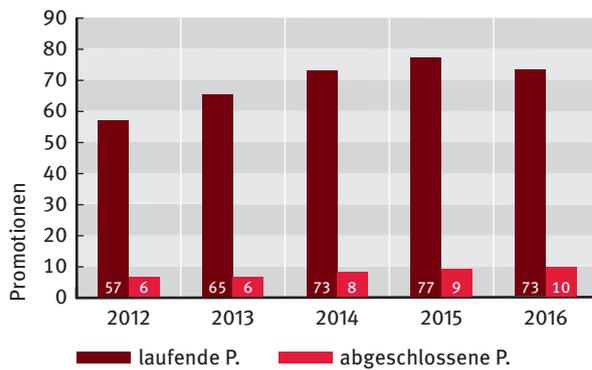


Abb. 2: Entwicklung der kooperativen Promotionen 2012 bis 2016

### 3. Publikationsaufkommen

Die Professorinnen und Professoren sowie die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Hochschule haben 2016 insgesamt 234 wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht, wovon 66 als Zeitschriftenaufsatz oder Dissertation erfolgreich ein Peer-Review-Verfahren durchlaufen haben und deshalb in Evaluationen häufig mehrfach gewertet werden. Im betrachteten Zeitraum von 2012 an ist eine sehr positive Entwicklung der Publikationszahlen zu erkennen, die sich auch in einer Verbesserung im Vergleich mit den anderen HAWs in Baden-Württemberg widerspiegelt.

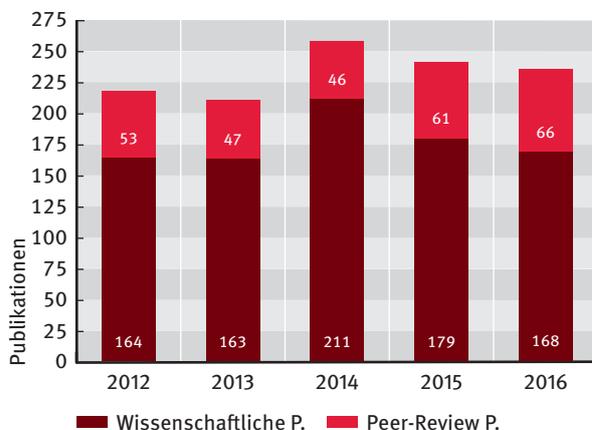


Abb. 3: Entwicklung der erfassten wissenschaftlichen Publikationen 2012 bis 2016

Das Forschungsprofil der Hochschule Karlsruhe wird durch drei interdisziplinäre Schwerpunkte geprägt. Diese wurden von der Hochschulrektorenkonferenz (HRK) positiv evaluiert und sind deshalb auf der HRK-Forschungslandkarte vertreten. Die Energiebereitstellung und -speicherung einzelner Verkehrsträgertechnologien wie beispielsweise neue Antriebskonzepte sind Thema im Forschungsschwerpunkt „Energieeffizienz und Mobilität“. Im Forschungsschwerpunkt „In-

telligente Systeme“ werden solche Systeme erforscht, die sich über die Verarbeitung von Signalen oder die Interpretation des Nutzerverhaltens individuell an den Nutzer anpassen. Der Fokus des Forschungsschwerpunkts „Materialien, Prozesse und Systeme“ liegt auf neuen Modellierungstechniken für die Werkstoffsimulation, Optimierungen in der Produktions- und Fertigungstechnik sowie auf der Fluidynamik.

Ende 2016 waren 63 Professorinnen und Professoren am IAF und IMP tätig, die von insgesamt 269 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den jeweiligen Instituten unterstützt wurden. Diese arbeiteten entweder in den Projekten selbst und in der Verwaltung oder brachten sich beispielsweise als Netzwerkadministratoren, Übersetzer oder als wissenschaftliche Hilfskräfte ein. Auch in anderen Organisationseinheiten der Hochschule Karlsruhe betätigten sich Professorinnen und Professoren sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Forschung; sie wurden aber nicht gesondert erfasst. Die Finanzierung der Projektmitarbeiter der beiden zentralen Forschungseinrichtungen IAF und IMP erfolgt ausschließlich aus Drittmitteln. Zusätzlich stellt die Hochschulleitung 4,5 Stellen für die fachliche Organisation der Forschung in den verschiedenen Forschungsbereichen zur Verfügung.

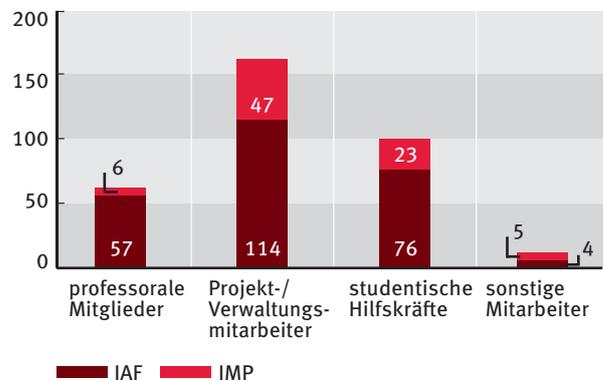


Abb. 4: Anzahl der Professorinnen und Professoren sowie der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IAF und des IMP 2016

#### Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner**

Prorektor für Forschung, Technologietransfer, Kooperationen, Qualitätsmanagement, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

**Elena Stamm M.A.**

Referentin des Rektorats

# Phasenfeldsimulationen zur Mikrostrukturentwicklung während des Sinterprozesses

Johannes Hötzer, Michael Kellner, Veronika Rehn, Marco Seiz und Britta Nestler

## Motivation

Keramische Materialien finden neben dem Einsatz als Tonbehälter und Gläser immer mehr Anwendung als Werkstoffe in technisch anspruchsvollen Bereichen. Gleitlager im Maschinenbau, Hitzeschilder in der Raumfahrt sowie die aus dem Automobilbereich bekannten Lambda-Sonden sind nur einige Beispiele. Für derartige Anwendungen bedarf es einer genau eingestellten Mikrostruktur des zugrunde liegenden Werkstoffs. Die Mikrostruktur beschreibt die Anordnung der einzelnen Kristalle, deren chemische Zusammensetzung, Form, Atomgitterstruktur sowie deren Defekte wie Poren und Fremdstoffe. Die sich entwickelnde Mikrostruktur kann über den jeweiligen Herstellungsprozess beeinflusst werden. Im Falle von Keramiken kommt fast ausschließlich der Sinterprozess zur Anwendung, da die hohen Schmelzpunkte ( $\gg 2000$  K) der Keramiken für einen Gießprozess einen zu großen Energieaufwand erfordern. Hierbei wird ein aus losen Partikeln gepresster Körper, auch Grünkörper genannt, bei einer Temperatur von 70 – 90 % des Schmelzpunkts im Ofen gesintert. Aufgrund der erhöhten Temperatur werden die Atome mobil und beginnen durch Konzentrationsunterschiede entlang unterschiedlicher Diffusionspfade zu wandern. Die Korngrenzen und Oberflächen der Partikel stellen dabei im Vergleich zur Diffusion im Partikel schnelle Diffusionspfade dar. Durch die Materialumlagerung bildet sich ein zusammenhängendes Netzwerk der Partikel, indem sich diese unter einer sogenannten Sinterhalbildung annähern und dabei neue Korngrenzen bilden. Diese Prozesse führen zu einer Verdichtung des Grünkörpers und bilden das Anfangsstadium des Sinterns.

Im sich anschließenden Zwischenstadium formen die verbliebenen Hohlräume zwischen den Partikeln ein offenes Porennetzwerk, bestehend aus lang gezogenen kanalförmigen Gaseinschlüssen. Bei der weiteren Verdichtung schrumpfen diese Kanäle und können eingeschnürt werden. Dabei bilden sich vereinzelt Poren an den Korngrenzen.

Das Endstadium beginnt, sobald nur noch vereinzelt Poren vorhanden sind und eine Porosität von etwa 5 % erreicht ist. Durch weiteres Schrumpfen der Poren erhöht sich der Druck. Der erhöhte Druck wirkt einer weiteren Schrumpfung entgegen. Die Triebkraft für weitere Schrumpfung beruht nun auf dem Prozess der Kornver-

größerung, in dem größere Körner auf Kosten kleinerer wachsen. Bewegen sich Poren mit einer wachsenden Korngrenze mit, so kann ein weiteres Entweichen und eine Reduzierung des Porenanteils stattfinden. Ist die Pore jedoch nicht mobil genug, verbleibt sie im Korn als Restporosität und verhindert ein weiteres Sintern.

Trotz der häufigen Anwendung des Sinterns zur Herstellung von Keramiken, ist die Mikrostrukturentwicklung während des Prozesses noch nicht vollständig verstanden. Analytische Modelle leisten qualitative Aussagen über die Mikrostruktur, erfassen jedoch die Komplexität realer Gefüge nicht. Numerische Methoden wie die Phasenfeldmethode erlauben es, diese Gefügeänderungsprozesse simulativ zu untersuchen. Phasenfeldmodelle für die Beschreibung des Sinterprozesses stammen von Wang et al. [7], Agren et al. [1] und Jing et al. [4]. Um den hohen Rechenaufwand zur Simulation realistischer Mikrostrukturen mit solchen Modellen zu bewältigen, werden Supercomputer mit mehreren tausend Recheneinheiten eingesetzt.

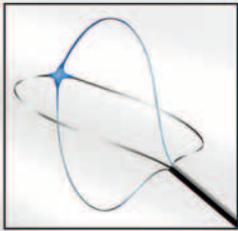
## Ergebnisse

Im Folgenden werden die mit Phasenfeldmodellen erzielten Ergebnisse zur Beschreibung des Anfangs- und Endstadiums vorgestellt.

Zur Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Diffusionspfade wird das für Supercomputer optimierte Softwarepaket PACE3D, das am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe entwickelt wird, mit dem thermodynamisch konsistenten Phasenfeldmodell von Choudhury [2] verwendet. Hierzu wird das Phasenfeldmodell um spezifische Diffusionskoeffizienten an den Grenzflächen erweitert. Dies erlaubt es, den Einfluss der einzelnen Diffusionspfade getrennt voneinander zu modellieren und zu untersuchen. Zur Validierung des Modells wird ein einfaches Zweiteilchensystem verwendet und das Verhältnis des Sinterhalsradius  $X$  zum Partikelradius  $r$  über die Zeit  $t$  gemessen. Der Aufbau des Zweiteilchensystems und der Halsradius  $X$  sind unten rechts in Abbildung 1(a) dargestellt. Analytisch kann der Sinterhalsradius über den Partikelradius  $r$ , den Koeffizienten  $A$  und den Exponenten  $n$  in der Form  $X/r = A \cdot t^n$  [5] beschrieben werden. Hierbei nimmt der Exponent, abhängig vom dominierenden Diffusionspfad, einen Wert im Bereich zwischen 0,14 bis 0,33 an.

## 1 Werkstoff - 1000 Möglichkeiten

ENDOSMART®: Dein Experte bei der Verarbeitung von Nitinol für medizintechnische Zwecke



**ENDOSMART**  
Medical Nitinol Solutions

[www.endosmart.de](http://www.endosmart.de) | [info@endosmart.de](mailto:info@endosmart.de)

Wir bieten innovativen Köpfen den Raum für ihre Ideen!

Das Kompetenzzentrum für Unternehmensgründungen

365+	UNTERNEHMEN BETREUT
97%	ERFOLGSQUOTE
6.500	ARBEITSPLÄTZE GESCHAFFEN

Haid-und-Neu-Str. 7 · 76131 Karlsruhe  
Telefon 0721-174 271 · [www.technologiefabrik-ka.de](http://www.technologiefabrik-ka.de)



**Technologiefabrik**  
Karlsruhe

Verbrauchsausweis, Heizenergieverbrauchskennwert 97 kWh/m<sup>2</sup>a, Stromverbrauchskennwert 75 kWh/m<sup>2</sup>a, Erdgas

## Theoretisch

bringt Ihnen die Uni alles bei.

## Praktisch

lernen Sie bei uns jeden Tag dazu.



Gemeinsam bringen wir die Dinge voran: Wir von der EnBW entwickeln intelligente Energieprodukte, machen unsere Städte nachhaltiger und setzen uns für den Ausbau erneuerbarer Energien ein. Und dafür benötigen wir tatkräftige Unterstützung.

Egal, ob Praxiseinsätze während des Studiums oder direkter Berufseinstieg danach – wir sind immer auf der Suche nach engagierten Talenten, die sich mit ihrem Fachwissen einbringen und zusammen mit uns die Energiezukunft gestalten. Im Gegenzug bieten wir spannende Aufgaben und vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten.

Machen Sie jetzt mit: [www.enbw.com/karriere](http://www.enbw.com/karriere)



Wir machen das schon.



In Abbildung 1(a) sind die Simulationsergebnisse der unterschiedlichen aktivierten Diffusionspfade für den normierten Halsradius doppellogarithmisch aufgetragen. Die Steigungen der Ausgleichsgeraden für die Messpunkte entsprechen den Exponenten  $n$ . Die Kurvenverläufe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den analytisch vorhergesagten Werten. Die Entwicklung der Partikelform zu unterschiedlichen Zeitpunkten und für unterschiedlich aktive Diffusionspfade ist in Abbildung 1(b) dargestellt. Wie theoretisch erwartet, zeigt die Korngrenzdifffusion die schnellste Annäherung der Partikel, während die Simulation mit reiner Volumendiffusion praktisch keine Partikelannäherung und somit keine Sinterung im betrachteten Zeitraum aufweist.

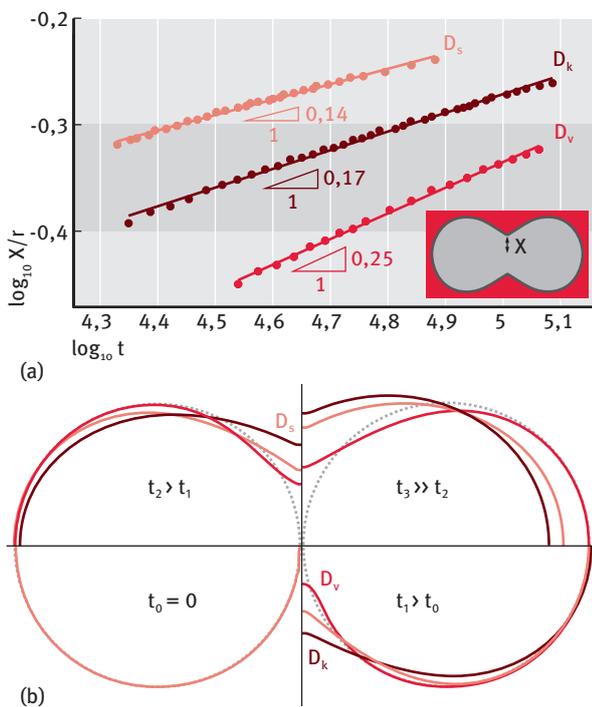


Abb 1: (a) Doppellogarithmisch aufgetragener Verlauf des Verhältnisses von Halsradius zu Partikelradius  $X/r$  über die Zeit  $t$  mit einer schematischen Abbildung der Geometrie des Zweiteilchensystems; (b) Verlauf der Konturlinien für vier verschiedene Zeiten  $t_3 \gg t_2 > t_1 > t_0 = 0$  und Diffusionspfade für Volumendiffusion  $D_v$ , Oberflächendiffusion  $D_s$  und Korngrenzdifffusion  $D_k$ . Die Kreis-kontur entspricht der Anfangssituation in allen Quadranten.

Im weiteren Verlauf des Sinterprozesses schnüren sich, wie oben beschrieben, die kanalförmigen Poren ab. Die isolierten Poren nehmen dabei abhängig vom entstehenden Innendruck ein stabiles Volumen an. Um den Einfluss der Poren an Korngrenzen im Endstadium zu untersuchen, wird das Phasenfeldmodell von [3] verwendet. In Abbildung 2(a) ist die simulierte hexagonale Mikrostruktur nach Tikare et al. [6] gezeigt, wobei die Poren gelb dargestellt sind. Das darüber platzierte große Korn (nicht dargestellt) wächst mit konstanter

Geschwindigkeit nach unten. Die Poren werden von der sich bewegenden Korngrenze mitgezogen. Die Geschwindigkeit hängt von der Mobilität der Korngrenze ab. Durch systematisches Variieren des Verhältnisses  $M$  von Oberflächen- zu Korngrenzmobilität kann der Übergang von Ablösen und Anhaften der Poren an der Korngrenze zu dem großen Korn untersucht werden. Hierbei wird der Übergang für das Ablösen der Poren im Bereich von  $M = 0,0425$  und  $M = 0,05$  gefunden.

In Abbildung 2(a) werden die aus der Simulation gemessenen Geschwindigkeiten vor und nach dem Ablösen mit den analytischen Geschwindigkeiten verglichen. Die analytische Geschwindigkeit vor dem Ablösen ist als gestrichelte und die nach dem Ablösen als durchgezogene Linie dargestellt. Die gemessenen Geschwindigkeiten aus den Simulationen vor dem Ablösen sind als rote und nach dem Ablösen als grüne Punkte eingezeichnet. Die Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Analytik und illustrieren den deutlichen Einfluss der Poren auf das Kornwachstum. Für Verhältnisse von  $M > 0,04$  wird kein Ablösen der Poren beobachtet. In den Simulationen ist zudem eine stetige Änderung der Porenform nahe dem Übergangspunkt von Anhaften und Ablösen zu sehen. Die Formen der Poren sind in Abbildung 2(b) zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten für die unterschiedlichen Verhältnisse  $M$  dargestellt. Poren, die eine im

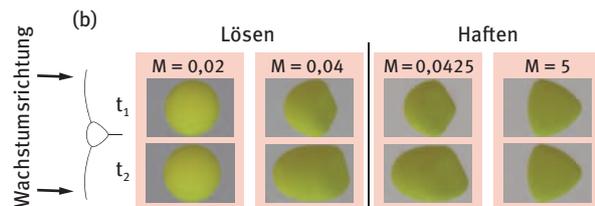
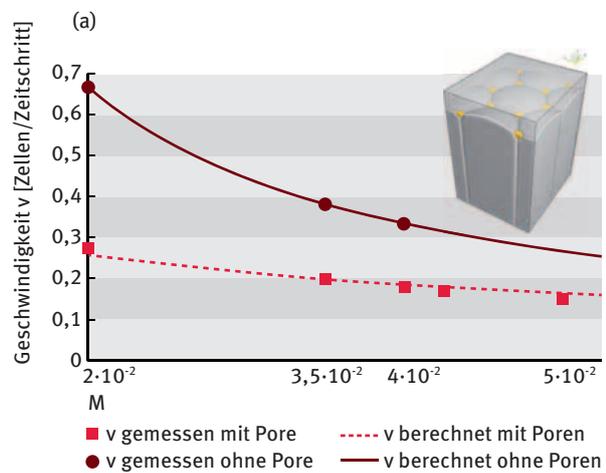


Abb. 2: (a) Geschwindigkeit der Korngrenze vor und nach dem Ablösen in Abhängigkeit des Verhältnisses  $M$  von Oberflächen- zu Korngrenzmobilität; (b) Entwicklung der Porenform während des Ablösevorgangs.

Vergleich zur Korngrenze hohe Mobilität aufweisen, werden mitgezogen und bilden eine Eiswaffelform. Bei einer geringeren Mobilität verhalten sich die Poren wie Hindernisse und werden sofort überwachsen, ohne dabei ihre Form zu ändern. Im Übergangsbereich für das Ablösen bewegen sich die Poren senkrecht zur Wachstumsrichtung und verformen sich dabei kontinuierlich. Diese Erkenntnisse erlauben Rückschlüsse von der Porenform auf das Ablöseverhalten in Experimenten.

#### Ausblick

Auf Basis von Phasenfeldsimulationen wurde zunächst der Sinterprozess im Anfangsstadium für unterschiedliche Diffusionsmechanismen anhand eines Zweiteilchensystems untersucht. Für das Endstadium wurde anschließend das Ablöseverhalten von Poren an Korngrenzen erforscht. In weiteren Arbeiten sollen die hier vorgestellten Phasenfeldmodelle zur Untersuchung des gesamten Sinterprozesses in Simulationen zusammengefügt werden, um Vorhersagen für die Ausbildung von realen Mikrostrukturen zu gewinnen.

#### Literatur

- [1] K. Asp and J. Agren, *Phase-field simulation of sintering and related phenomena: A vacancy diffusion approach*. *Acta Materialia*, 54(5):1241–1248, 2006.
- [2] A. Choudhury and B. Nestler, *Grand-potential formulation for multicomponent phase transformations combined with thin-interface asymptotics of the double-obstacle potential*, *Physical Review E*, 85(2):021602, 2012.
- [3] J. Hötzer, V. Rehn, W. Rheinheimer, M. J. Hoffmann, and Britta Nestler, *Phase-field study of pore-grain boundary interaction*, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 124(4):329–339, 2016.
- [4] X.N. Jing, J.H. Zhao, G. Subhash, and X.-L. Gao, *Anisotropic grain growth with pore drag under applied loads*, *Materials Science and Engineering: A*, 412:271278, 2005, *International Conference on Recent Advances in Composite Materials*.
- [5] M. N. Rahaman, *Ceramic Processing and Sintering*, 1, 2003.
- [6] V. Tikare, M. A. Miodownik, and E. A. Holm, *Three-dimensional simulation of grain growth in the presence of mobile pores*, *Journal of the American Ceramic Society*, 84(6):1379–1385, 2001.
- [7] Y. U. Wang, *Computer modeling and simulation of solid-state sintering: A phase field approach*, *Acta Materialia*, 54(4):953961, 2006.



SAP  
next-gen

#### Innovation with Purpose

SAP Next-Gen Labs connect universities with industry partners interested to seed in disruptive innovation with researchers, students and startups

- Join a community focused on innovation with purpose
- Share your thought leadership and collaborate with other thought leaders in academia and industry
- Educate industry partners with skills for digital futures
- Connect students with companies recruiting next generation innovators
- Showcase startups with corporates seeking to seed in disruptive innovation

Are you interested? Contact us: [sapnextgen@sap.com](mailto:sapnextgen@sap.com)



THE GLOBAL GOALS  
For Sustainable Development



Innovate  
with purpose  
linked to the  
17 UN Global  
Sustainability  
Goals

## Abstract

The production of customized ceramic components, with defined properties, requires a deep understanding of the sintering process. Phase-field simulations enable the investigation of the influence of different physical as well as process parameters on microstructure formation. In the first part, a two-particle-model is used to study the effects of different diffusion paths on the microstructure evolution in the initial stage. In the second part, the interaction of pores along grain boundaries in the final stage of the sintering process is analyzed.

## Zusammenfassung

Für die Herstellung maßgeschneiderter keramischer Bauteile mit vorgegebenen Eigenschaften ist ein umfassendes Verständnis des Sinterprozesses notwendig. Phasenfeldsimulationen erlauben es, gezielt den Einfluss von verschiedenen physikalischen Größen sowie von Prozessparametern auf die Mikrostrukturausbildung zu untersuchen. Im ersten Teil wird der Einfluss der verschiedenen Diffusionspfade auf die Mikrostrukturentwicklung im Anfangsstadium anhand eines Zweiteilchenmodells untersucht. Im zweiten Teil wird die Wechselwirkung von Poren an Korngrenzen im Endstadium des Sinterprozesses analysiert.

## Autoren

**Johannes Hötzer M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe und Doktorand am Institut für Angewandte Materialien – Computational Materials Science (IAM-CMS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Leiter der Arbeitsgruppe High Performance Materials Computing and Data Science

**Dipl.-Ing. Michael Kellner**

Doktorand am Institut für Angewandte Materialien (IAM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mitglied der Arbeitsgruppe High Performance Materials Computing and Data Science sowie des Kooperativen Promotionskollegs „Gefügestrukturanalyse und Prozessbewertung“ des KIT und der Hochschule Karlsruhe

**Veronika Rehn B.Sc.**

**Marco Seiz B.Sc.**

Studierende der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Wissenschaftliche Hilfskräfte am Institut für Angewandte Materialien (IAM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

**Prof. Dr. Britta Nestler**

Professorin an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der Hochschule Karlsruhe sowie am Lehrstuhl für Mikrostruktursimulation in der Werkstofftechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und Direktorin des Institute of Materials and Processes (IMP) an der Hochschule Karlsruhe sowie des Instituts für Angewandte Materialien – Computational Materials Science (IAM-CMS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

## Kontakt

Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik  
Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [britta.nestler@hs-karlsruhe.de](mailto:britta.nestler@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-1504



**In den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen bieten wir:**

- **TÄTIGKEITEN ALS WERKSTUDENT**
- **PRAXISSEMESTER**
- **ABSCHLUSSARBEITEN (BACHELOR/MASTER)**

## WIR LASSEN FLUGZEUGE FLIEGEN

Unsere Werkzeuge und Anlagen sind die erste Wahl, wenn es um den Bau und die Wartung von Flugzeugen oder Triebwerken geht. Als Marktführer mit weltweiter Präsenz beschäftigen wir über 600 Mitarbeiter und sind auf Expansionskurs.

HYDRO Systems KG  
Ahfeldstrasse 10

77781 Biberach/Baden  
+49 (0) 7835 787-0

**Werden Sie Teil unserer Crew! [www.hydro.aero/karriere](http://www.hydro.aero/karriere)**



# Simulation der martensitischen Transformation in polykristallinen Gefügen mit der Phasenfeldmethode

Ephraim Schoof, Nick Streichhan, Daniel Schneider, Michael Selzer und Britta Nestler

## Motivation

Computersimulationen sind ein herausragendes Werkzeug um mikrostrukturelle Phänomene und Prozesse zu erforschen, die experimentell nur schwer zu beobachten sind. Die immer höheren technischen Anforderungen an Materialien und ihre Eigenschaften setzen eine genaue Kenntnis der Prozesskette zur Herstellung eines Werkstoffes voraus. Durch Simulationen können die verschiedenen Prozessparameter besser verstanden, zuverlässige Prognosen getroffen und somit Produktionskosten und Entwicklungszeit reduziert werden.

Dualphasenstahl ist aufgrund seiner hervorragenden Kombination von hoher Festigkeit bei gleichzeitig guter Umformbarkeit ein attraktiver Werkstoff für industrielle Anwendungen. Während der Herstellung durchläuft das Material mehrere mechanische und thermische Prozesse. Abbildung 1 zeigt schematisch eine mögliche Prozessroute. Auf das Kaltwalzen folgt durch die Rekristallisation die Ausbildung der gewünschten Korngröße. Anschließend wird der Stahl gegläht, sodass das Gefüge teilweise austenitisiert und danach abgeschreckt. Dies führt zur Ausbildung eines teilmartensitischen Gefüges. Durch die verschiedenen Ausprägungen der einzelnen Verfahrensschritte können die gewünschten Eigenschaften eingestellt werden. Im Blickpunkt stehen hierbei die Morphologie der Körner und die Phasenumwandlungen. Letztere beinhalten auch die martensitische Transformation, eine der wichtigsten Phänomene im Stahl.[1] Martensit ist ein Nichtgleichgewichtsgefüge und entsteht durch eine schnelle Abkühlung des Stahls aus Austenit, wobei die Atome auf den Gitterplätzen keine Zeit haben zu diffundieren und das Atomgitter umklappt. Durch den Umklapp-Prozess entsteht eine tetragonale Verzerrung, wodurch der Martensit dem Werkstoff eine hohe Festigkeit und Härte verleiht.

## Simulationsaufbau

Für die Simulation der martensitischen Umwandlung als ein Teilschritt bei der Herstellung von Dualphasenstahl dient die Phasenfeldmethode [2], die auf eine mathematisch elegante Weise Grenzflächenbewegungen beschreiben kann. Die Phasenfeldgleichung beinhaltet neben Termen für die Oberflächenkräfte auch die treibenden Kräfte für die Umwandlung: die chemischen und die elastischen Anteile. Die chemische treibende Kraft fördert die Martensitentstehung. Die durch den Gitterumklapp-Prozess eingebrachten Verzerrungen wirken als elastische treibende Kraft der Martensitumwandlung entgegen. Zur Lösung der Evolutionsgleichungen steht am Institut of Materials and Processes die Software „Parallel Algorithms for Crystal Evolution in 3D“ (PACE3D) zur Verfügung.

Bei der martensitischen Umwandlung herrscht eine Orientierungsbeziehung zwischen der parentalen austenitischen Phase und den entstehenden martensitischen Kristallen.[3] Für die Simulationen wird die Beziehung nach Bain gewählt. Es gibt somit drei mögliche Martensitvarianten, die je nach Raumrichtung eine unterschiedliche Verzerrung aufweisen.[4] Implementiert werden diese über phasenabhängige Bainsche Dehnungen. Das zweidimensionale Simulationsgebiet besteht aus einem polykristallinen Gefüge aus Austenitkörnern verschiedener Orientierungen. Die Werkstoffparameter werden anhand des Referenzwerkstoffes Fe-31%Ni gewählt. Es werden periodische Randbedingungen an den Rechengebietsrändern verwendet.

## Auswertung und Diskussion:

Um das Simulationsmodell zu kalibrieren und zu validieren, werden in Parameterstudien verschiedene

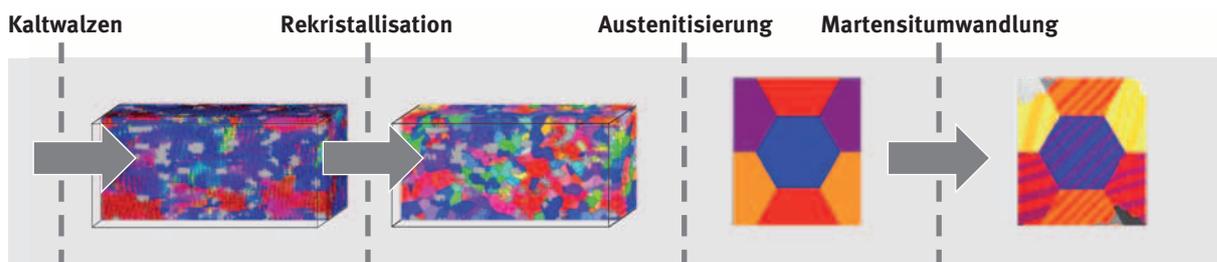


Abb. 1: In den verschiedenen Schritten einer Prozesskette ändert sich das Gefüge durch die unterschiedlichen Wärmebehandlungen.

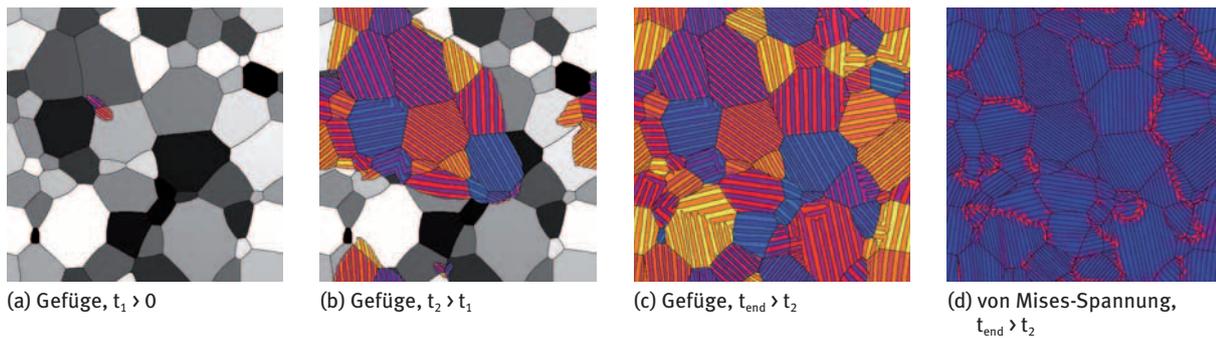


Abb. 2: Nukleation und Wachstum martensitischer Varianten in einem polykristallinen Gefüge a) bis c). Die Spannungsverteilung ist in d) dargestellt. Große Spannungsspitzen bilden sich an den Stellen, an denen Wachstumsfronten zusammenstoßen.

Parameter variiert und deren Einflüsse auf die Phasenumwandlung und Gefügebildung untersucht. Der Verlauf der Referenzsimulation ist in Abbildung 2 gezeigt. Zu Beginn liegt eine rein austenitische Mikrostruktur vor. Zum Zeitpunkt  $t_1$  bildet sich ein martensitischer Keim an einem Korngrenztripelpunkt, der sich ausbreitet. Im Anschluss daran ist die Bildung weiterer Keime im zeitlichen Verlauf der Umwandlung zu beobachten (siehe  $t_2$ ). Nach der Zeit  $t_{end}$  ist die Transformation vollständig abgeschlossen und die nadelförmige Struktur des Martensits gut zu erkennen.

Um das Nukleieren der Martensitvarianten zu ermöglichen, wird ein Term für zufällig induziertes numerisches Rauschen in die Phasenfeldgleichung eingebracht. Die Amplitude ist ein Maß für die Stärke dieser Störung und repräsentiert thermodynamische Schwankungen.

Die chemische treibende Kraft berechnet sich aus der Unterkühlung. Damit Martensit entstehen kann, muss das System unter eine kritische Temperatur für die Entstehung martensitischer Keime abgekühlt werden. Bei Variation der Unterkühlung und damit der chemischen treibenden Kraft sind in den Simulationsergebnissen eine vermehrte Keimbildung, eine schnellere Umwandlung und dünnere Lamellen zu erkennen. Die

prozentuale Umwandlung in Martensit in Abhängigkeit der Unterkühlung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Keimbildung tritt bevorzugt heterogen an Tripelpunkten auf. Für zu große Parameterwerte nukleieren an allen Phasengrenzen Martensitvarianten. Für zu geringe Unterkühlungen und kleine Keime tritt keine Nukleation auf und es findet keine Umwandlung statt.

Die Bainschen Dehnungen resultieren aus der tetragonalen Verzerrung des Martensits, da die Elementarzelle in eine Richtung gestreckt und in die anderen beiden Richtungen gestaucht wird. In den Simulationen kann gezeigt werden, dass die Martensitlamellen mit steigenden Bainschen Dehnungen, d.h. bei steigendem Kohlenstoffgehalt kleiner werden, da durch das parallele Anordnen der Martensitvarianten die elastischen Kräfte reduziert werden. Für sehr große Bainsche Dehnungen werden die Verzerrungen im Laufe der Umwandlung zu stark. Durch die entstehenden Spannungen kann sich an bestimmten Stellen kein Martensit bilden, sodass Restaustenit erhalten bleibt. In diesen Bereichen liegt auch eine Überhöhung der Spannung vor. Die Bainschen Dehnungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Umwandlungsgeschwindigkeit. Mit steigenden Dehnungen wird die Dynamik verlangsamt.

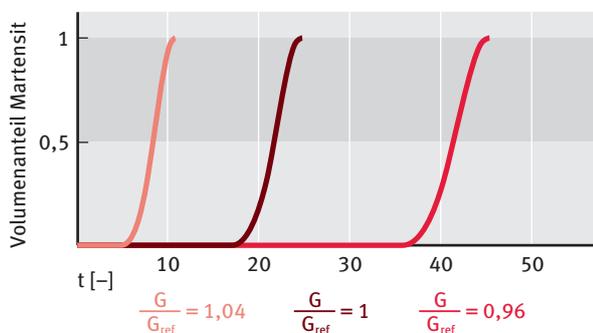
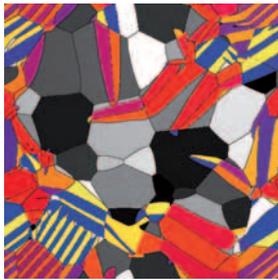
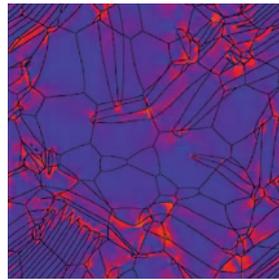


Abb. 3: Volumenanteil des Martensits in Abhängigkeit der Zeit für unterschiedliche chemische treibende Kräfte  $G$ . Je größer die Unterkühlung, desto schneller erfolgt die Nukleation und Umwandlung von Austenit in Martensit.

Die tetragonale Verzerrung des Martensits geht mit einer Volumenzunahme einher. In den bisherigen Simulationsbeispielen wurde dieser Effekt vernachlässigt. Bei dessen Berücksichtigung fällt aber auf, dass sich das Gefüge nicht vollständig umwandelt und Restaustenit erhalten bleibt. Dabei nimmt der Anteil an verbleibendem Austenit mit steigendem Volumenzuwachs pro umgewandelter Elementarzelle zu. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, breiten sich die Martensitlamellen bevorzugt im Doppelpack (als sogenannte Zwillinge) aus. Diese wachsen in die Körner und über die Grenzen hinaus, bilden jedoch keine weiteren Nadeln an ihrer Seite. Ein steigender Volumeneffekt behindert folglich die Transformation. Die sich bilden-



(a) Gefüge,  $t = t_{\text{end}}$



(b) von Mises-Spannung,  
 $t = t_{\text{end}}$

Abb. 4: Bei Berücksichtigung der Volumenzunahme wandelt sich das Gefüge nicht vollständig um.

den Gefüge weisen eine große Ähnlichkeit mit experimentell gemessenen Mikrostrukturen auf.[5]

#### Fazit

Das entwickelte Modell zur Simulation der martensitischen Umwandlung im Stahl ist in der Lage, die reale Phasenumwandlung sehr gut zu beschreiben. Für eine steigende chemische treibende Kraft sowie eine geringere Bainische Dehnung konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die Keimbildung als auch die

Umwandlung begünstigt werden. Dies ist auch in Experimenten zu erwarten. Durch eine Volumenzunahme wird die Martensitbildung behindert. Neben der grafischen Auswertung der Parameterstudien wurden Umwandlungsdiagramme erzeugt, mit denen es möglich ist, den Beginn, die Dauer und Umwandlungsgeschwindigkeit sowie den Restaustenitgehalt zu ermitteln.

Durch die Parameterstudien der martensitischen Transformation wurden wichtige Erfahrungen über das Verhalten bei der Umwandlung gesammelt. Sie legen den Grundstein für weiterführende Simulationen in dreidimensionalen Rechengebieten.

#### Danksagung

Die Autoren danken der Förderung der Forschungsarbeit durch das Graduiertenkolleg 1483 der Deutschen Forschungsgemeinschaft und durch die Helmholtzprogramme „EMR - Energy efficiency, Materials and Resources“ sowie das Portfoliopjekt „Materials Science for Energy and its Applications in Thin Film Photovoltaics in Energy Efficiency“.

**MSC Software®**

**Adams**  
Powerful Simulation  
for Mechanical Drive Systems

[www.mscsoftware.com/de](http://www.mscsoftware.com/de)

## Literatur

- [1] M. Umemoto, E. Yoshitake, I. Tamura, *The Morphology of martensite in Fe-C, Fe-Ni-C and Fe-Cr-C alloys*, Journal of Materials Science, 18:2893-2904, 1983.
- [2] B. Nestler, H. Garcke, B. Stinner, *Multicomponent alloy solidification: Phase-field modeling and simulations*, Physical Review E, 71(4):041609, 2005.
- [3] C. Cabus, H. Regle, B. Bacroix, *Phases transformation textures in steel*, Journal de Physique IV France, 120:137-144, 2004.
- [4] A. Yamanaka, T. Takaki, Y. Tomita, *Elastoplastic phase-field simulation of martensitic transformation with plastic deformation in polycrystals*, International Journal of Mechanical Sciences, 52:245-250, 2010.
- [5] P. Rios, J. Guimarães, *Microstructural Path Analysis of Martensite Burst*, Materials Research, 13(1):119-124, 2010.

## Abstract

With a coupled material model for describing phase transitions and mechanical stress conditions, the solid phase transformation of an austenitic steel into a polycrystalline martensitic microstructure is simulated. In agreement with experimental findings, our calculations show a preferred formation of martensitic variants at triple junctions and grain boundaries. The simulations provide insight into the pattern formation and into microstructural characteristics depending on various process parameters.

## Zusammenfassung

Mit einem gekoppelten Materialmodell zur Beschreibung von Phasenumwandlungen und mechanischen Spannungszuständen wird die Festphasenumwandlung eines austenitischen Stahls in eine polykristalline martensitische Mikrostruktur simuliert. In Übereinstimmung mit experimentellen Resultaten zeigen unsere Berechnungen eine bevorzugte Entstehung der martensitischen Varianten an Korngrenztripelpunkten und Korngrenzen. Die Simulationen geben Einblick in die Gefügeumwandlungen und in mikrostrukturelle Charakteristika in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter.

## Autoren

**Ephraim Schoof M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe

**Nick Streichhan B.Sc.**

Studierender am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und wissenschaftliche Hilfskraft am Institute of Materials and Processes der Hochschule Karlsruhe

**Dipl.-Phys. Daniel Schneider**

**Dr.-Ing. Michael Selzer**

Akademische Mitarbeiter am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe und am Institut für Angewandte Materialien – Computational Materials Science (IAM-CMS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

**Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler**

Professorin an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der Hochschule Karlsruhe sowie am Lehrstuhl für Mikrostruktursimulation in der Werkstofftechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und Direktorin des Institute of Materials and Processes – Computational Materials Science and Engineering (IMP-CMSE) an der Hochschule Karlsruhe sowie des Instituts für Angewandte Materialien – Computational Materials Science (IAM-CMS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

## Kontakt

**Ephraim Schoof M.Sc.**

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Institute of Materials and Processes (IMP)

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: ephraim.schoof@hs-karlsruhe.de

# Lösung von Task Scheduling- und Optimierungsproblemen durch schwarmintelligente Neuroagenten

Stefan Paschek, Christoph Fuchs, Patrick Sauter, Thomas Barteit, Peter Huber und Hans-Werner Dorschner

## Einleitung

Um wettbewerbsfähig zu bleiben ist es heutzutage für Betriebe notwendig, ihre Ressourcen zeitlich optimal auszunutzen, um möglichst hohe Maschinenauslastungen zu gewährleisten. Kleine bis mittlere Betriebe in der pharmazeutischen Laboranalyse besitzen jedoch meist keine Planungssysteme, um Maschinenbelegungen zu berechnen. Dies hat häufig zur Folge, dass das Ressourcenmanagement per Hand durchgeführt wird. Dabei werden einzelne Proben als Aufgaben definiert, welche in mehrere Tasks gegliedert sind. Eine Probe kann dadurch je nach Konfiguration mehrere Maschinen in einem Labor durchlaufen. Umrüstzeiten zwischen den Proben auf den Maschinen können sich je nach Abarbeitungsreihenfolge der Proben ändern, wodurch Tasks in Deadlines geschoben werden können. Sequenz und Maschinenreihenfolgen der Tasks müssen berücksichtigt werden. All dies zeigt, dass Menschen bei der Vielzahl an Aufträgen (bis zu 1000 Aufträge sind keine Seltenheit bei mittleren Analyselaboren), Ressourcen und unterschiedlichen Prozessbedingungen schnell an ihre Grenzen stoßen, um einen effizienten Arbeitsplan zu erstellen. Durch die Verwendung von neuronalen Netzen und Schwarmintelligenz soll hier für Labore im pharmazeutischen Bereich die Möglichkeit geschaffen werden, effiziente Ressourcenpläne schnell und einfach zu generieren und somit Ressourcen und Kosten zu sparen.

## Problem – und Aufgabenstellung

Das Ziel war es, die Methoden der künstlichen Intelligenz praktisch in ein Ressourcenmanagementsystem zu integrieren. Die umgesetzten Algorithmen sollen dabei selbstorganisierend und durch möglichst geringe Parametrierung und User-Eingaben ausführbar sein. Die neuronalen Netze müssen dabei eine Liste ungeordneter und zeitlich nicht fixierter Tasks ordnen und Beschränkungen in ihrer Abarbeitungsreihenfolge sowie Ressourcenzuordnung, Tageszeiten und Deadlines berücksichtigen. Das Gesamtsystem muss somit in der Lage sein, einen funktionsfähigen Arbeitsplan mit Task-Maschinenzuordnung zu generieren.

## Praktische Durchführung

Die Entwicklung des neuronalen Grundsystems geschah über mehrere Phasen in einem evolutionären Prozess. Das System wurde dabei sukzessive erwei-

tert von anfangs zwei neuronalen Netztypen bis hin zu einer schwarmintelligenten Neuroagentenstruktur mit nachgeschalteter Optimierung.

## Erste Phase – Grundstruktur

In der ersten Phase wurde das neuronale Netz modelliert und implementiert. Als Ausgangsbasis dient dabei [1] sowie [2]. Diese Ansätze gehen von zwei neuronalen Netzen, dem SC-Netz (Sequenz Constrain Network) und dem RC-Netz (Ressource Constrain Network) aus. Ein neuronales Netz ist dabei eine Verbindung zwischen zwei Tasks. Die neuronalen Netze beeinflussen

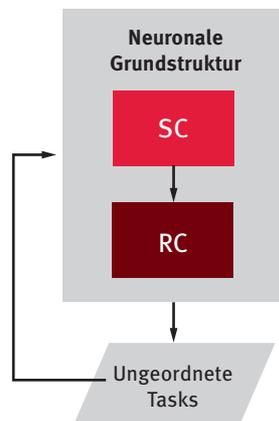


Abb. 1: Neuronale Grundstruktur zur Planerstellung bestehend aus SC- und RC-Netzen

sich über die Taskstartzeiten sowie ihre Verschiebungsoperatoren. Es besteht jedoch keinerlei direkte Kommunikation der Netze miteinander. Diese simplen Netzstrukturen erlauben es bereits, Tasks auf ihren zugewiesenen Maschinen zu verteilen sowie einen funktionierenden und optimierten Plan zu erstellen. Das Prinzip-Schaubild ist in Abbildung 1 dargestellt.

In der Implementierung beginnen die SC-Netze alle Tasks derselben Aufgabe auf Sequenzverletzungen zu vergleichen und zu verschieben. Ist diese Überprüfung beendet, werden die RC-Netze dazu übergehen, alle Tasks auf den jeweiligen Maschinen zu überprüfen. Im RC-Fall werden alle möglichen Taskkombinationen auf jeder Maschine durchgetestet. Das RC-Netz detektiert dabei durch eine vorgegebene Logik, welcher Task der Vorgänger ist und berechnet anschließend die Verschiebung. Somit schieben die Netze die Tasks kontinuierlich auseinander. Zur Reduktion des Berechnungsaufwands wurde auf eine Vollvernetzung verzichtet, sodass nur noch direkt benachbarte Tasks miteinander vernetzt sind. Somit konnte die Anzahl an Vernetzungen von  $n!$  auf  $n-1$  verringert werden. Haben die Netze alle Tasks so verteilt, dass es weder zu einer Überschneidung in der Sequenz noch auf der Maschine kommt, ist ein gültiger Plan erstellt worden und das Programm wird beendet.

**Zweite Phase – Neuroagent**

In dieser Phase sollten Taskdeadlines berücksichtigt werden. Hierfür müssen die Netze eine Dead-Line-Überschreitung eines Tasks erkennen, darauf reagieren und wenn möglich beheben. Diese Anforderungen überschreiten die Fähigkeiten des bisherigen neuronalen Netzes. Daher wurde hier das Konzept des Neuroagenten entwickelt. Der Neuroagent erweitert das neuronale Netz um die Fähigkeit, Tasks anhand von fix vorgegebenen Regeln anzuordnen. Diese werden als Reflexe bezeichnet. Die Kommunikation der Netze untereinander sowie die Logik zur Dead-Line-Vermeidung sind Abschnitte, die vorprogrammiert sind. Sollte also ein Task in die Deadline geraten, werden diese Programmabschnitte reflexartig ausgeführt, ähnlich wie bei einem Menschen, der sich die Hand am Ofen verbrennt und diese reflexartig, ohne nachzudenken wegzieht. Die Kommunikation selbst erfolgt über Statusbits der Tasks. Die Abbildung 2 zeigt dabei die eingetretene Evolution. Das KNN bildet noch immer den dynamischen Kern des Neuroagenten, jedoch sind Kommunikation und Reflexe fix programmiert.

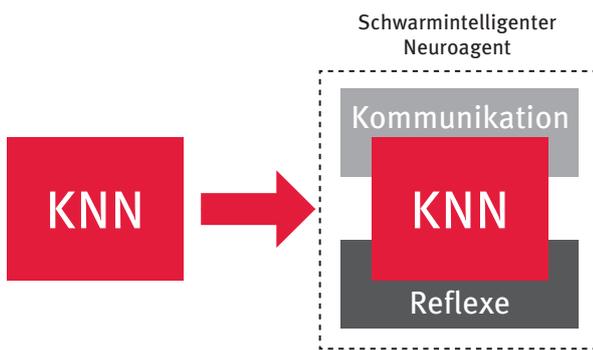


Abb. 2: Evolution des KNN zum schwarmintelligenten Neuroagenten

**Dritte Phase – Optimierung**

In dieser Phase wurde der Algorithmus auf die initiale Verteilung der Tasks auf Maschinen unter Berücksichtigung der Rüstzeit erweitert. Dabei werden die Tasks anhand der initialen Maschinenkonfiguration sowie der Auslastung auf die Maschinen verteilt. Des Weiteren wurde der bisherige neuronale Ansatz um eine Optimierungsphase ergänzt. Hierfür war es notwendig, ein neues neuronales Netz zu entwickeln. Dieses Netz hat die umgekehrte Aufgabe zu den RC- und SC-Netzen. Es sorgt für ein kontinuierliches Zusammenschieben des bisherigen Plans um Lücken zu schließen. In der Optimierung selbst werden nun die Tasks der ineffizientesten Aufgaben in eventuell vorhandene Lücken geschoben.

**Vierte Phase – Rangordnung und hybrider Ansatz**

In der vierten Phase wurde ein Taskrangordnungsverfahren implementiert. Dabei wird für jeden Task eine

eindeutige Rangordnung errechnet und abgespeichert. Die Neuroagenten verwenden nun den neuen Rang, um die Tasks anzuordnen. Dieser hybride Ansatz aus Rangordnungsverfahren und Neuroagenten bietet vor allem den Vorteil, dass Tasks anhand ihrer Deadlines vorsortiert werden können, und die Abarbeitungsgeschwindigkeit erhöht wird. Somit kann erreicht werden, Deadlines von Anfang an zu vermeiden. Die dafür erstellte Architektur ist in der Abbildung 3 dargestellt und zeigt die einzelnen Module und deren Interaktion miteinander.

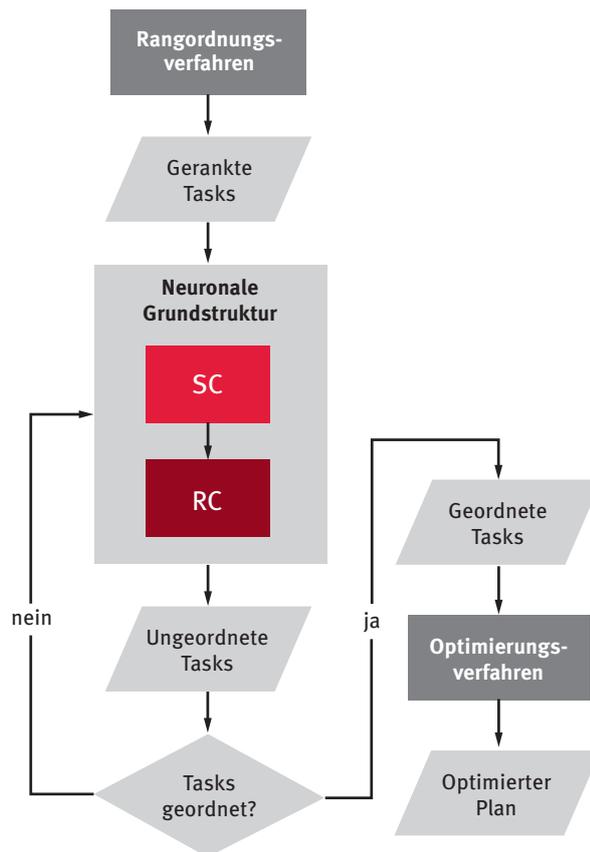


Abb. 3: Architektur des Rangfolgeverfahrens mit neuronaler Grundstruktur und anschließendem Optimierungsverfahren

**Ergebnis**

Durch die Kombination der neuronalen Netze, der Schwarmintelligenz und des Rangordnungsverfahrens mit dem nachgeschalteten Optimierungsverfahren lassen sich die bisher vorhandenen Optimierungsmöglichkeiten umsetzen. Durch all diese Mechanismen lässt sich eine Auslastungssteigerung auf durchschnittlich über 90 % verbuchen. In Abbildung 4 oben ist ein erstellter Plan im Endzustand ohne Optimierung zu erkennen. Dieser weist eine durchschnittliche Auslastung von 82,0 % auf. Der in Abbildung 4 unten dargestellte Plan ist optimiert. Dieser ist mit circa 92,2 % Auslastung stark verbessert und senkt somit Leerlaufzeiten und Kosten.

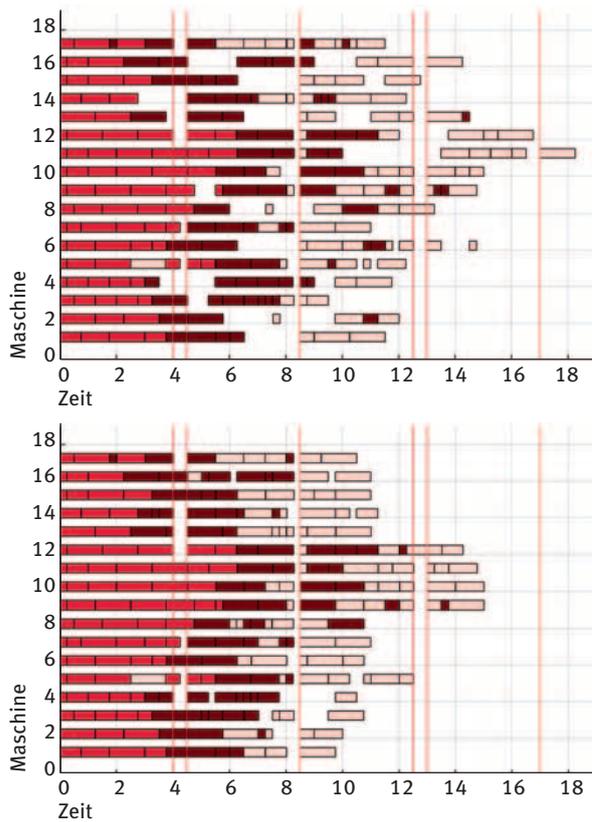


Abb. 4: Nicht optimierter (oben) und optimierter Plan (unten)

**Literatur**

- [1] T. Williems, L. Brandts, *Implementing heuristics as an optimization criterion in neural networks for job-shop scheduling*, Journal of Intelligent Manufacturing, S. 377-387, 1995.
- [2] A. Yahyaoui, F. Fnaiech, N. Fnaiech, *A Suitable Initialization Procedure for Speeding a Neural Network Job - Shop Scheduling*, IEEE, S. 1052-1060, 2011.

**Ausblick**

Der beschriebene Algorithmus stellt einen Prototyp dar, der im Sinne eines „Proof of Concept“ erfolgreich funktioniert. Somit sind alle Grundsteine gelegt, um die Software industriereif weiterzuentwickeln. Dabei können die Algorithmen auch in verschiedenen Objektcodes implementiert werden. Chemische Labore haben somit die Möglichkeit, eine für sie zugeschnittene Softwarelösung zur Taskverteilung zu nutzen, Engpässe zu identifizieren und ihre Prozesse zusätzlich zu optimieren.

**Abstract**

This article introduces a new concept for solving task scheduling and resource optimization problems with swarm intelligent neuro agents. During the development process, a task-scheduling tool was created by combining neural networks with swarm intelligence. The newly developed algorithm is capable of scheduling tasks according to their sequence and resource constraints. Furthermore, it is possible to optimize internal production timing. Finally, job deadline constraints can also be included in the planning process.

**Zusammenfassung**

Dieser Artikel stellt ein neues Konzept vor, um mit schwarmintelligenten Neuroagenten Task Scheduling- und Optimierungsprobleme zu lösen. Dabei konnten die Methoden der neuronalen Netze mit der Methode der Schwarmintelligenz fusioniert werden, um ein Planungstool, z.B. für pharmazeutische Labore zu entwickeln. Der entwickelte Algorithmus ist in der Lage, Aufträge unter Berücksichtigung ihrer Anforderungen auf Maschinen anzuordnen. Des Weiteren ist es möglich, den Produktionsablaufplan hinsichtlich der Gesamtlaufzeit zu optimieren und schließlich können auch Dead-Line-Beschränkungen der Aufgaben berücksichtigt werden.

**Autoren**

- Stefan Paschek M.Sc.
- Christioph Fuchs B.Eng.
- Patrick Sauter B.Eng.
- Thomas Barteit B.Eng.

Akademische Mitarbeiter an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

Peter Huber M.Eng.  
Laborbetriebsleiter an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Dorschner  
Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe; Fachgebiet Elektrotechnik, Automatisierungstechnik und Intelligente Systeme

**Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Dorschner  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: hans-werner.dorschner@hs-karlsruhe.de  
Telefon: 0721 925 1866

# Digitalisierungskompetenz im deutschen Maschinen- und Anlagenbau

Steffen Kinkel

Die Digitalisierung durchdringt und vernetzt immer mehr Industriebereiche und Geschäftsprozesse. Eine Schlüsselrolle spielt hier der deutsche Maschinen- und Anlagenbau als Anbieter und Anwender digital vernetzter Produkte, Prozesse und Geschäftsmodelle. Die Studie „Digital-vernetztes Denken in der Produktion“ analysiert für die Impuls-Stiftung des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), welche Strategien und Maßnahmen die Unternehmen zum Auf- und Ausbau der notwendigen Digitalisierungskompetenzen verfolgen und wie viele ihrer Beschäftigten bereits über die erforderlichen Qualifikationen verfügen. Dazu wählten das Institut für Lernen und Innovation in Netzwerken (ILIN) an der Hochschule Karlsruhe und das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI drei empirische Zugänge, deren Kombination einen umfassenden und vertiefenden Einblick ermöglicht:

- eine spezifische Online-Befragung von insgesamt 335 VDMA-Mitgliedsunternehmen
- 15 Experteninterviews mit Vertretern von Unternehmen, von denen acht als „Vorreiter“ und sieben eher als „Einsteiger“ in die Digitalisierung ihrer Produkte und Prozesse charakterisiert werden können
- eine Auswertung der repräsentativen Erhebung *Modernisierung der Produktion 2015* des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI bei 1 282 Betrieben des deutschen Verarbeitenden Gewerbes, davon 223 aus dem Maschinen- und Anlagenbau

Die zentralen Erkenntnisse der Studie lassen sich in die vier Bereiche Digitalisierungsstrategie, Digitale Technologien und Dienste, Organisation der Digitalisierung und Digitalisierungskompetenzen gliedern.

## 1. Digitalisierungsstrategie

Die Digitalisierung ist als strategisches Zukunftsthema im deutschen Maschinen- und Anlagenbau angekommen – bislang jedoch nur selten in der Personalentwicklung. Ein Drittel der befragten Unternehmen hat eine dezidierte Digitalisierungsstrategie, ein weiteres Viertel will in den nächsten drei Jahren eine Digitalisierungsstrategie einführen. Dies schlägt sich auch in spezifischen Investitionen und Neueinstellungen für die Digitalisierung nieder. Bedenklich ist jedoch, dass sich die Personalentwicklung bislang nur in etwa jedem fünften

Unternehmen strategisch mit den Herausforderungen der Digitalisierung auseinandersetzt.

Wie sich zudem zeigt, ist für eine erfolgreiche Umsetzung der Digitalisierungsstrategie eine breite Verankerung und „Mut zum schnellen Scheitern“ hilfreich. Digitalisierungsstrategien sind erfolgreicher, wenn Ziele und Herausforderungen transparent kommuniziert werden und in der Belegschaft Verständnis für die anstehenden Veränderungen herrscht. Dabei sollte von Anfang an eine bereichsübergreifende Implementierung angestrebt werden, insbesondere eine konsequente Vernetzung von Service, Produktmanagement, Entwicklung und Produktion. Für solch weitreichende Wandlungsprozesse wie die digitale Transformation ist zudem eine positive Fehlerkultur unumgänglich, um Dinge pragmatisch ausprobieren zu können und aus den gemachten Erfahrungen schnell zu lernen: „Be brave and fail fast!“

## 2. Digitale Technologien und Dienste

Der Maschinen- und Anlagenbau nimmt als Anbieter digitaler Technologien und Services im Verarbeitenden Gewerbe eine Führungsrolle ein. Bei der Anwendung digitaler Technologien zur Vernetzung der eigenen Produktion ist er aber nicht führend. Diese Position ist auch Folge seiner strukturellen Bedingungen. Kleine Losgrößen limitieren die Einsatzpotenziale in der eigenen Produktion, andererseits bietet die individuelle Auftragsfertigung komplexer Investitionsgüter eine hervorragende Basis für digitalisierte Produkt- und Serviceangebote.

Weiterhin zeigt sich, dass avancierte digitale Technologien und Dienste derzeit noch von relativ wenigen Unternehmen angeboten werden – aber dann häufig selbst entwickelt werden. Angesichts der intensiven Diskussion um das hohe Potenzial von Konzepten wie Maschine-zu-Maschine-Kommunikation, Predictive Maintenance und datenbasierten Diensten als Wegbereiter für neue Geschäftsmodellansätze ist das derzeitige Angebot noch eher verhalten. Dafür ist die Dynamik der in den nächsten drei Jahren geplanten Einführungen sehr hoch und diese Technologien werden überwiegend selbst entwickelt (s. Abb. 1). Hier scheinen die Unternehmen mehrheitlich Kernkompetenzen zu sehen, mit denen sie einen Mehrwert für ihre Kunden schaffen können. Eine besondere Rolle kommt

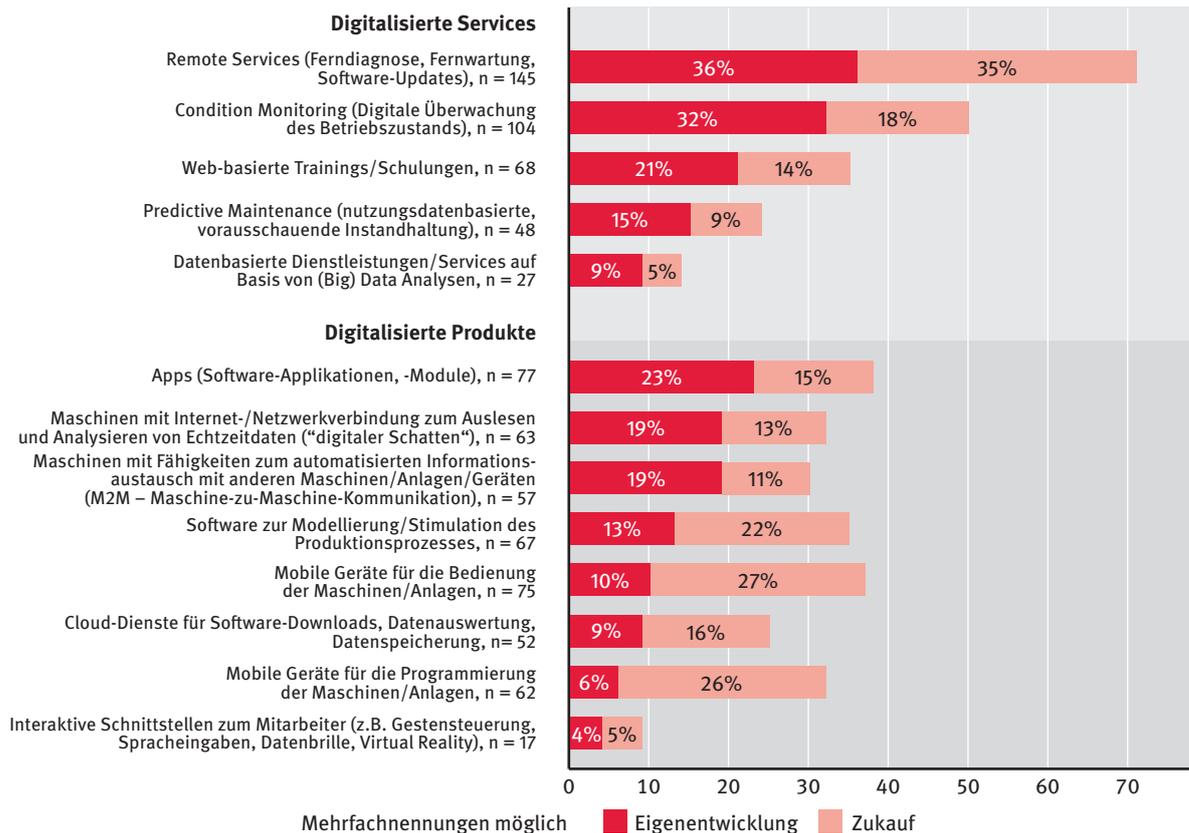


Abb. 1: Make or buy (Eigenentwicklung vs. Zukauf) digitaler Technologien für die eigenen Produkte und Dienstleistungen

dabei modularen Apps zu, die je nach Wettbewerbsposition auf offenen oder geschlossenen Plattformen angeboten werden können.

### 3. Organisation der Digitalisierung

Bei Neueinstellungen für die Digitalisierung haben kleine Unternehmen eher Schwierigkeiten bei der Rekrutierung entsprechender IT- und Software-Spezialisten als große Unternehmen. Sie betreiben daher häufiger eine Auslagerung der Softwareentwicklung an externe Dienstleister. Eine weitere strategische Option ist die Ausgliederung eigener IT- und Softwareunternehmen, die ein erstaunlich hoher Anteil (ein Fünftel) der befragten Unternehmen anwendet. Gründe hierfür sind die organisatorische Trennung zur Unterstützung der „zwei Entwicklungsgeschwindigkeiten“ von traditionellem Maschinenbau und agiler Softwareentwicklung, der Zugang zu neuen Branchen und Geschäftsmodellen sowie die höhere Anziehungskraft eines eigenständigen kleinen Softwareunternehmens für die Gewinnung qualifizierten IT-Personals.

Ein wichtiger Befund der Studie ist, dass agile Entwicklungsmethoden und Lean Management als wichtige „Befähiger“ für die Digitalisierung von Produkten und Prozessen fungieren können. Agile oder designorientierte Entwicklungsprozesse werden bislang noch von

wenigen Unternehmen eingesetzt. Dabei scheinen diese Methoden die Fähigkeit zur eigenen Entwicklung digitaler Produkte und Services signifikant befördert zu können. Eine wirksame Alternative können individuelle Freiräume für einzelne Mitarbeiter mit Affinität zum Thema Digitalisierung bieten, um die Entwicklung vernetzter Produkte, Prozesse oder Services voranzutreiben. Weiterhin zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem Einsatz von Lean-Konzepten und der Fähigkeit der Unternehmen zur Nutzung digitaler Produktionsprozesse. Schlanke, geordnete Prozesse nach Lean-Prinzipien scheinen demnach eine wichtige Voraussetzung zu sein, um digitale und vernetzte Technologien in der eigenen Produktion erfolgreich einsetzen zu können.

### 4. Digitalisierungskompetenzen

Technische Schlüsselkompetenzen für die Digitalisierung liegen in der Softwareentwicklung von modularen Applikationen (Apps) und in der Programmierung der Maschinen- und Anlagensteuerungen. Zusätzlich wichtig sind Kompetenzen bei der IT-Sicherheit und beim benutzerorientierten IT-Design. Bei der Eigenentwicklung digitalisierter Produkte oder Services „fortgeschrittene“ Unternehmen weisen in diesen Bereichen signifikant höhere Beschäftigtenanteile auf als „Einsteiger“ oder „Außenstehende“. Ratsam ist zudem, Mitarbeiter der ver-

schiedenen Ingenieur- und IT-Disziplinen, insbesondere der applikationsorientierten Hochsprachenprogrammierung und der Maschinen- und Steuerungsprogrammierung bei Projekten konsequent zusammenarbeiten zu lassen, um die Sichtweise der „verschiedenen Welten“ gegenseitig verstehen zu lernen.

Wie sich zeigt, sind auch eine Reihe nicht-technischer Kompetenzen wichtig für eine erfolgreiche Umsetzung der Digitalisierung. Fähigkeiten im Verständnis der Kundenprobleme und in der Analyse komplexer Daten sind eine wichtige Basis dafür, um einen Mehrwert für den Kunden erkennen und darauf aufbauend eigene, tragfähige Geschäftsmodelle entwickeln zu können. Als zunehmend wichtig werden zudem Fähigkeiten in der interkulturellen Kommunikation und interdisziplinären Zusammenarbeit eingeschätzt. Es besteht ein wachsender Bedarf an qualifizierten Mitarbeitern, die verschiedene Disziplinen zusammenführen und zwischen verschiedenen Bereichen vermitteln können. Dies zeigt,

dass digitale Innovationen immer mehr an Grenzflächen zwischen verschiedenen Disziplinen stattfinden und interdisziplinäres Verständnis benötigen.

### **Online-Benchmarking zur Selbstbewertung für Unternehmen**

Die reichhaltigen Ergebnisse der Online-Befragung bieten interessierten Unternehmen die Möglichkeit, ihre eigenen Digitalisierungskompetenzen durch ein Online-Benchmarking zur Selbstbewertung im Vergleich zu dieser breiten Datenbasis zu verorten. Dazu können die Unternehmen die Größenklasse der Vergleichsfirmen auswählen, mit denen sie sich vergleichen möchten. Aufgrund ihrer eigenen Eingaben können sie dann herausfinden, ob sie bei spezifischen Indikatoren in den Hauptkategorien „Digitalisierungsstrategie“ und „Digitalisierungskompetenzen“ jeweils zu den „Außenstehenden“, „Einsteigern“ oder „Fortgeschrittenen“ gehören. Das Online-Benchmarking kann unter [www.digitalisierungskompetenz-benchmark.de](http://www.digitalisierungskompetenz-benchmark.de) genutzt werden.

#### **Abstract**

The study “Digital Thinking in Production” analyzes the strategies and key competences for the digital transformation of companies in the German mechanical engineering industry. Digitization has become a strategic cornerstone for future development in the mechanical engineering industry. Yet, human resource development is rarely integrated in these strategies. Key competencies are software development, programming and data analysis, the sound understanding of customer problems and increasingly interdisciplinary cooperation. It is difficult for small companies to recruit specialists in these areas. An option here is the spinning off their IT and software companies, which is done by a surprisingly large number of companies. In addition, agile development methods are important for the successful development of digitized products and services.

#### **Zusammenfassung**

Die Studie „Digital-vernetztes Denken in der Produktion“ analysiert für die IMPULS-Stiftung des VDMA, welches die Schlüsselkompetenzen für die digitale Vernetzung sind und welche Strategien und Maßnahmen die Unternehmen des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus hier verfolgen. Wie sich zeigt, ist die Digitalisierung als strategisches Zukunftsthema im Maschinenbau angekommen – bislang

jedoch nur selten in der Personalentwicklung. Schlüsselkompetenzen liegen in der Softwareentwicklung, Programmierung und Datenanalyse, im Verständnis der Kundenprobleme und zunehmend in der interdisziplinären Zusammenarbeit. Kleine Unternehmen haben Schwierigkeiten bei der Rekrutierung entsprechender Spezialisten. Eine Option ist hier die Ausgliederung eigener IT- und Softwareunternehmen, die von erstaunlich vielen Unternehmen betrieben wird. Für die erfolgreiche Eigenentwicklung digital-vernetzter Produkte und Services sind zudem agile Entwicklungsmethoden wichtig.

#### **Autor**

**Prof. Dr. Steffen Kinkel**

Professor an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der Hochschule Karlsruhe

#### **Kontakt**

Prof. Dr. Steffen Kinkel

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik  
Leiter des Instituts für Lernen und Innovation in Netzwerken (ILIN)

Moltkestr. 30

76133 Karlsruhe

[steffen.kinkel@hs-karlsruhe.de](mailto:steffen.kinkel@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-2915

# Characterization of the mechanical behavior of laminated foils used to form blister Packages

Simon Müller, Marius Huff, Jörg-Uwe Bippus and Sabine M. Weygand

## Introduction

Blister packs are a special type of pharmaceutical packaging which consist of two primary components. The first component is the cavity which contains the product. The second is the lidding foil that seals the product into the cavity so that the packed product is protected against environmental influences. In Europe, blister packaging is the preferred method for storing tablets. Currently, there are two types of blister packs available, thermoformed or cold-formed blister packages. The thermoformed blister packs are produced by thermoforming thermoplastic polymer foil above room temperature. The cold-formed blister packages are manufactured by cold stretching of aluminum-polymer laminate foils at room temperature. Due to the aluminum layer in this composite material, the cold-formed packages have a typical metallic look as can be seen in Figure 1.



Fig. 1: Example of a cold-formed blister package

Here, the aluminum layer serves as a barrier. Therefore, the product is better protected against moisture, light, oxygen and other gases than in a thermoformed blister pack. Consequently, the life span of the packed tablet is extended. However, the laminate foil possesses less formability, which leads to bigger cavities than needed for the product, which makes the whole blister package bigger and so material is wasted. The companies currently developing forming machines for cold-formed blister packs are trying to reduce the wastage by designing the optimal punch geometry to form an ideal cavity. They are dealing with two problems. Firstly, they do not normally produce the laminate foils so

they generally have little knowledge about their forming behavior. Furthermore, only very limited information about the mechanical behavior of aluminum-polymer laminate foils is available /has been published. Therefore, the definition of the optimal punch geometry is still a challenge and one of the critical development stages for the developers of cold-forming blister packaging machines.

To find out more about the mechanical behavior of aluminum-polymer laminate foils we developed a forming device that allows us to investigate the stretch forming process in our laboratory. With this device, we analyzed two commercially available comparable laminate foils from different manufacturers.

## Materials and experimental setup

In this work, we investigated common aluminum-polymer laminate foils from two suppliers, which we call Material A (from company A) and Material B (from company B). Both foils have an equivalent multi-layer structure and only differ in a few micrometers thickness. A representative microstructure is shown in Figure 2.

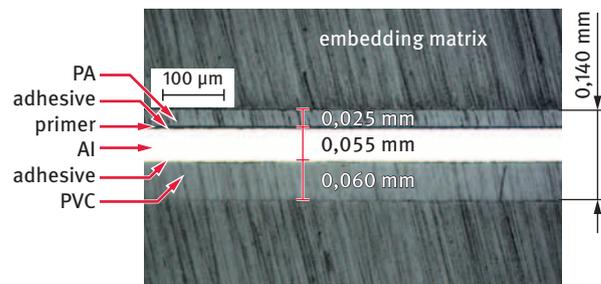


Fig. 2: Grinding pattern of an aluminum-polymer laminate foil

The laminate foils consist of an outer layer of orientated polyamide (PA), a core layer of aluminum (Al), an inner layer of polyvinyl chloride (PVC) with adhesive and primer layers in-between.

For the characterization of the stretch forming behavior a forming device was developed which allows performing stretch forming tests in our materials science laboratory. Figure 3 shows a cross section.

This device was designed according to the forming station in a commercial blister-packing machine. It was

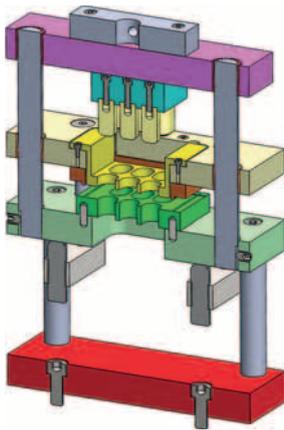


Fig. 3: Cross section of the forming device (equipped in this case with nine punches)

equipped with connections to our universal testing machine 'Inspekt 200' from the company Hegewald & Peschke. The advantage of the equipped device against the packaging machine is the possibility to measure the force and the displacement directly. Furthermore, the stretch forming can be performed without any guide bars. In contrary to Figure 3 only one axisymmetric punch was used in the experiments. The geometry of the punch is shown in the following diagrams. Because of its rather complex dimensions and the limited scope of this paper, a detailed description of the punch geometry cannot be given here. Due to its self-lubricating properties the punch was made of polytetrafluoroethylene (PTFE) which is common for cold-forming blister packaging machines.

guide bars were removed for the tests. The cavities are formed by a downward motion of the punch. Here, the punch is moved to a defined displacement with a constant velocity. The foil specimens were clamped by draw beads between the die plate and the clamping plate with the PA layer facing the punch. The reaction force  $F$  and the displacement  $u$  are measured by the testing machine.

**Results and Discussion**

In the first series of experiments the laminate foil was formed to a cavity depth of  $u = 6$  mm. The tests were performed with constant velocities  $v$  of 1, 10, 100 and 500 mm/min. The resulting force-displacement-curves of the Material A are shown in Figure 4 and of Material B in Figure 5. The profile of the curves shows a quadratic increase in force at the beginning of the forming process. The slope increases up to a forming depth of about 2,5 mm. Here, the point of inflexion occurs and the slope of the curve decreases with increasing cavity depth. At a drawing depth of 6 mm, the slope of the curve tends towards zero. In the analysis of the curves it can be seen that the forming behavior of the aluminum-polymer laminate foil depends on the forming velocity or rather on the strain rate. The faster the forming process the higher the forces that are needed to reach the same cavity depth.

The experiments were performed at room temperature. To reduce the friction force to a minimum the

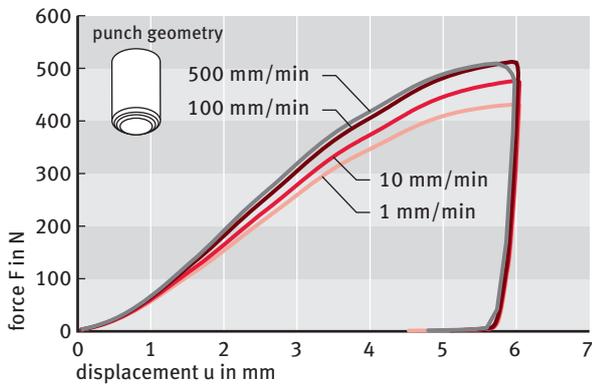


Fig. 4: Force-displacement-curves of Material A

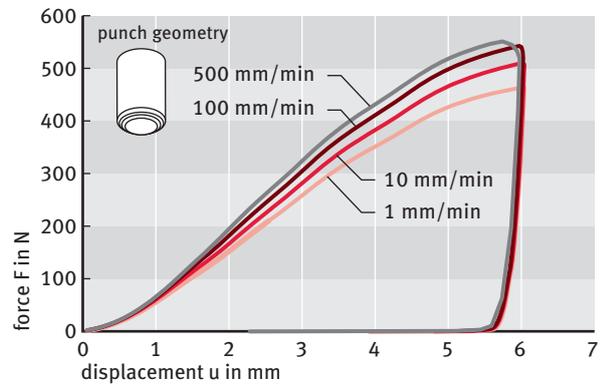


Fig. 5: Force-displacement-curves of Material B

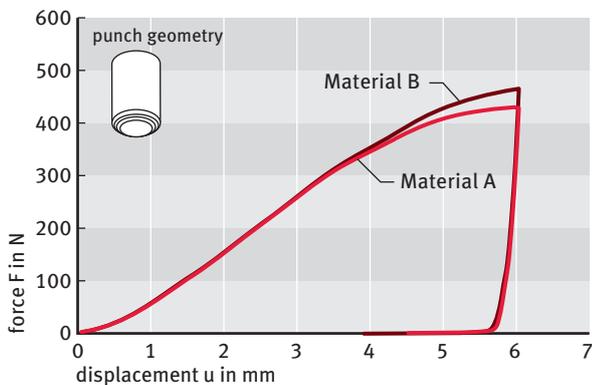


Fig. 6: Comparison of the laminate foils at a velocity of 1 mm/min

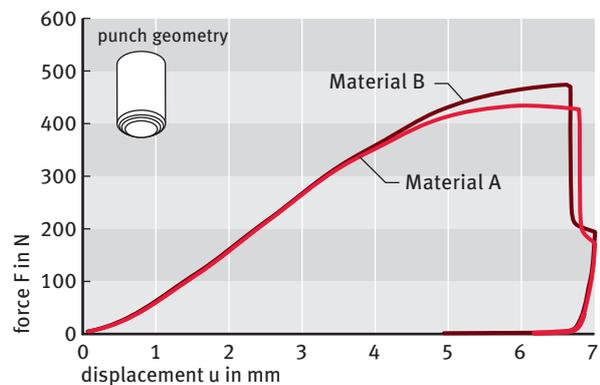


Fig. 7: Comparison of the laminate foils at a velocity of 1 mm/min

The diagrams indicate a difference in the mechanical behavior of the two foils. To allow a comparison between the foils of the different manufacturers the force-displacement-curves with forming velocity of  $v = 1 \text{ mm/min}$  are plotted in one diagram in Figure 6. At the beginning the forming behavior of the two materials is identical. From a drawing depth of 4 mm, the curve of Material B increases in comparison to the curve of Material A. The load at maximum depth shows a clear difference. For different forming velocities the materials behave similarly.

In the second series of experiments the laminate foil was formed to a cavity depth of  $u = 7 \text{ mm}$  to investigate the forming limit of the foil with the given punch geometry. The results are shown in Figure 7. Both materials fail at a forming depth of approximately 6,7 mm. It is

important to note that this value is subject to a certain spreading. Closer inspection of the failure shows that the PA layer tears first. Shortly after that, the aluminum layer fails. The PVC layer endures the whole punch movement.

#### Outlook

In future studies, we will use the stretch forming device to develop a more universal forming limit which can predict the failure of the laminate foil for any punch geometry. Here, the preferred criterion would be a forming limit diagram. For that we will measure the principal plastic strains on the surface of different cavities using a circle grid analysis. The forming limit diagram criterion will be used to optimize the punch geometries in finite element simulations.

#### Zusammenfassung

Für die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von Aluminium-Kunststoff-Laminatfolien wurde eine Streckziehvorrichtung entwickelt. Mit dieser Vorrichtung wurden Experimente mit Laminatfolien von zwei verschiedenen Herstellern durchgeführt. Diese zeigen ein dehnratenabhängiges Verformungsverhalten der Verbundmaterialien. Zusätzlich wurde eine Umformgrenze für eine bestimmte Stempelgeometrie ermittelt. Des Weiteren wird das unterschiedliche mechanische Verhalten der Folien während des Streckziehens aufgezeigt.

#### Abstract

For the characterization of the mechanical behavior of aluminum-polymer laminate foils a stretch forming device was developed. With this device experiments were performed with laminate foils from two different manufacturers. The experiments show that the forming behavior of the composite materials is strain rate dependent. Furthermore, a forming limit is determined for the given punch geometry. In addition, the difference between the mechanical behavior of the two foils during stretch forming is demonstrated.

#### Authors

**Simon Müller, M.Sc.**

Academic Assistant at the Institute of Applied Research (IAF) at Karlsruhe University of Applied Sciences

**Marius Huff, B.Eng.**

Graduate from the Faculty of Mechanical Engineering at Karlsruhe University of Applied Sciences  
**Dipl.-Ing. Jörg-Uwe Bippus**  
 Engineering Manager at Romaco Pharmatechnik GmbH

**Prof. Dr. mont. Sabine M. Weygand**

Professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics at Karlsruhe University of Applied Sciences

#### Contact

Prof. Dr. mont. Sabine M. Weygand  
 Karlsruhe University of Applied Sciences  
 Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics  
 Moltkestraße 30  
 76133 Karlsruhe  
 E-Mail: [sabine.weygand@hs-karlsruhe.de](mailto:sabine.weygand@hs-karlsruhe.de)

# Prädiktive Reichweitenberechnung – Modellierung des Energiebedarfs einer PKW-Klimatisierung

Kurt Kruppok, Felix Claret und Reiner Kriesten

## Einleitung

Bei Hybrid- und insbesondere bei Elektrofahrzeugen ist das „Nadelöhr“ die Traktionsbatterie. Die geringere Energiespeicherdichte im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen ermöglicht meist nur eine unzureichende Reichweite. Da nicht nur die Antriebseinheit, sondern auch sämtliche Nebenverbraucher wie beispielsweise das Klimatisierungssystem aus diesem Energiespeicher versorgt werden, kann es zum Zielkonflikt zwischen Reichweite und Komfort kommen, insbesondere wenn extreme Wetterbedingungen herrschen. In solchen Fällen beansprucht das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK) eine enorme Energiemenge, wodurch es zu weiteren Einbußen in der sowieso schon begrenzten Reichweite elektrifizierter Fahrzeuge kommt. Das führt dazu, dass ein intelligentes Energiemanagement für die Nebenverbraucher unumgänglich ist.

Zu einem solchen System gehören auch Energiebedarfsvorhersagen für die anstehende Fahrt, anhand derer Einsparpotenziale ermittelt und im Bedarfsfall Einschränkungen in einzelnen Systemen vorgenommen werden können. Dies dient dazu, alle Verbraucher so einzustellen, dass ein Kompromiss aus Reichweite und Komfort gefunden wird, um das gewünschte Ziel zu erreichen.

Damit Vorhersagen getroffen werden können benötigt es Modelle der einzelnen Nebenverbraucher, die anhand der Umgebungsbedingungen ermitteln, wie sich das jeweilige Teilsystem verhält. In diesem Zusammenhang ist besonders das HLK-System von Bedeutung, da es einerseits einen sehr hohen Leistungsbedarf hat und andererseits aufgrund seiner Komplexität diverse Einsparpotenziale bietet.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Klimamodell der Fahrzeugkabine ist Bestandteil des Forschungsprojekts „Entwicklung eines erweiterten Energiemanagements für Elektrofahrzeuge“, das seit April 2015 am Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) der Hochschule Karlsruhe im Rahmen eines Promotionsvorhabens bearbeitet wird.

Anhand der äußeren Bedingungen Außentemperatur, Sonnenintensität und Fahrt-/Windgeschwindigkeit

ermittelt das Modell die in die Fahrzeugkabine eintretenden Wärmeströme und stellt dadurch das thermische Verhalten der Kabine nach.

## Modell zur Bestimmung der Temperaturverteilung in der Fahrzeugkabine

Zur Bestimmung des Ist-Zustands in der Fahrzeugkabine müssen die äußeren Einflüsse auf die Fahrzeugkabine betrachtet werden. Grundlage für die Berechnung der Wärmeeinträge bildet die allgemeine Bilanz für den Wärmeeintrag in die Fahrzeugkabine. Dabei wird die Wärmeleistung  $\dot{Q}_{Strahl.}$  berücksichtigt, die aufgrund von Wärmestrahlung eintritt, die Wärmeleistung, die aufgrund von Absorption von Strahlung entsteht und die Wärmeleistung  $\dot{Q}_{Transmission}$ , die auf Wärmeleitung und Konvektion beruht. Die allgemeine Bilanz dazu lautet:

$$\dot{Q}_{Ges} = \dot{Q}_{Strahl.} + \dot{Q}_{Absorp.} + \dot{Q}_{Transmission}$$

Alle Wärmeströme sind abhängig von den jeweiligen Oberflächen  $A$  des bilanzierten Bauteils. Die Leistung durch Wärmestrahlung ist abhängig vom Gesamtemissionskoeffizient  $\varepsilon$  und der Temperaturdifferenz der beteiligten Komponenten. Daraus ergibt sich:

$$\dot{Q}_{Strahl.} = \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Befindet sich das Fahrzeug in freier Umgebung, wird ein Teil der Sonnenstrahlung  $\dot{q}_{Sonne}$  abhängig vom Absorptionsgrad  $\alpha_{Absorption}$  absorbiert. Daraus folgt:

$$\dot{Q}_{Absorption} = \alpha_{Absorption} \cdot A \cdot \dot{q}_{Sonne}$$

Der dritte berücksichtigte Anteil setzt sich aus Wärmeleitung und Konvektion zusammen und ist abhängig von der Materialdicke  $\delta$ , dem Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$ , dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  sowie der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenseite und lautet:

$$\dot{Q}_{Transmission} = \frac{A}{\frac{1}{\alpha_{außen}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{innen}}} \cdot \Delta T$$

Für die Bestimmung der Temperaturverteilung in der Kabine wird ein 5-Zonen-Modell umgesetzt, bei dem

die Fahrzeugkabine in fünf Teilvolumina aufgetrennt wird, für die jeweils eine eigene Wärmebilanz aufgestellt wird. Das Gesamtvolumen setzt sich dabei aus einem Kopfraum, einem Hauptraum, einem Fußraum sowie jeweils einem Raum oberhalb von Instrumententafel und Hutablage zusammen. Abbildung 1 zeigt die räumliche Anordnung der Zonen innerhalb der Fahrzeugkabine.

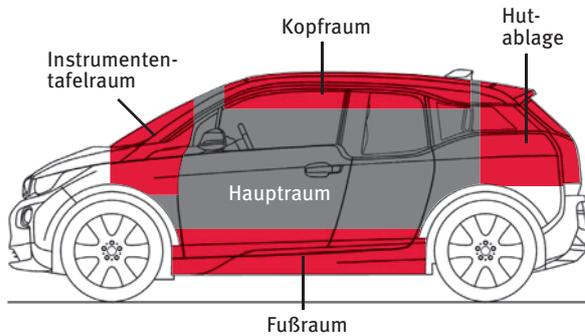


Abb. 1: Das 5-Zonen Modell unterteilt die Fahrzeugkabine in verschiedene Volumina

Die Kopplung der Volumina untereinander wird durch einen konvektiven Wärmeübergang dargestellt. Der Wärmeeintrag in die Fahrzeugkabine hinein geschieht über die Karosserieteile, die an das jeweilige Volumen angrenzen. Dazu gehören Teile wie das Dach oder die Scheiben. Jedes dieser Karosserieteile wird im erstellten Modell gesondert bilanziert, sodass die resultie-

renden Wärmeströme in die verschiedenen Teilvolumina bestimmt werden können. Die Karosserieteile Dach, Seitenwand und Unterboden sind geschichtete Bauteile, in deren Innerem sich isolierende Luftschichten befinden. Der Übergang in den Luftschichten wird durch einen zusätzlichen konvektiven Wärmeübergang umgesetzt. Abbildung 2 stellt eine Gesamtübersicht aller umgesetzten Wärmeübergänge dar.

Da durch die Scheiben ein großer Teil der Sonneneinstrahlung direkt in die Kabine eintritt, werden im Modell drei thermische Massen umgesetzt, die diese vollständig absorbieren. Die Massen sind mittels eines konvektiven Wärmeübergangs an das jeweilige Volumen gekoppelt.

Aufgrund der äußeren Bedingungen der Umgebungstemperatur, der Sonnenintensität und der Fahrt-/Windgeschwindigkeit wird dann der Temperaturverlauf simuliert. Das Ergebnis sind die Mitteltemperaturen der einzelnen Volumina, die für eine spätere Klimaregelung in der Fahrzeugkabine nötig sind.

**Ausblick**

Um das Modell für weitere Untersuchungen verwenden zu können, wird es in den nächsten Schritten validiert, damit die Simulationsergebnisse der Realität entsprechen. Dazu sollen Temperaturmessungen an dem institutseigenen Forschungsfahrzeug BMW i3

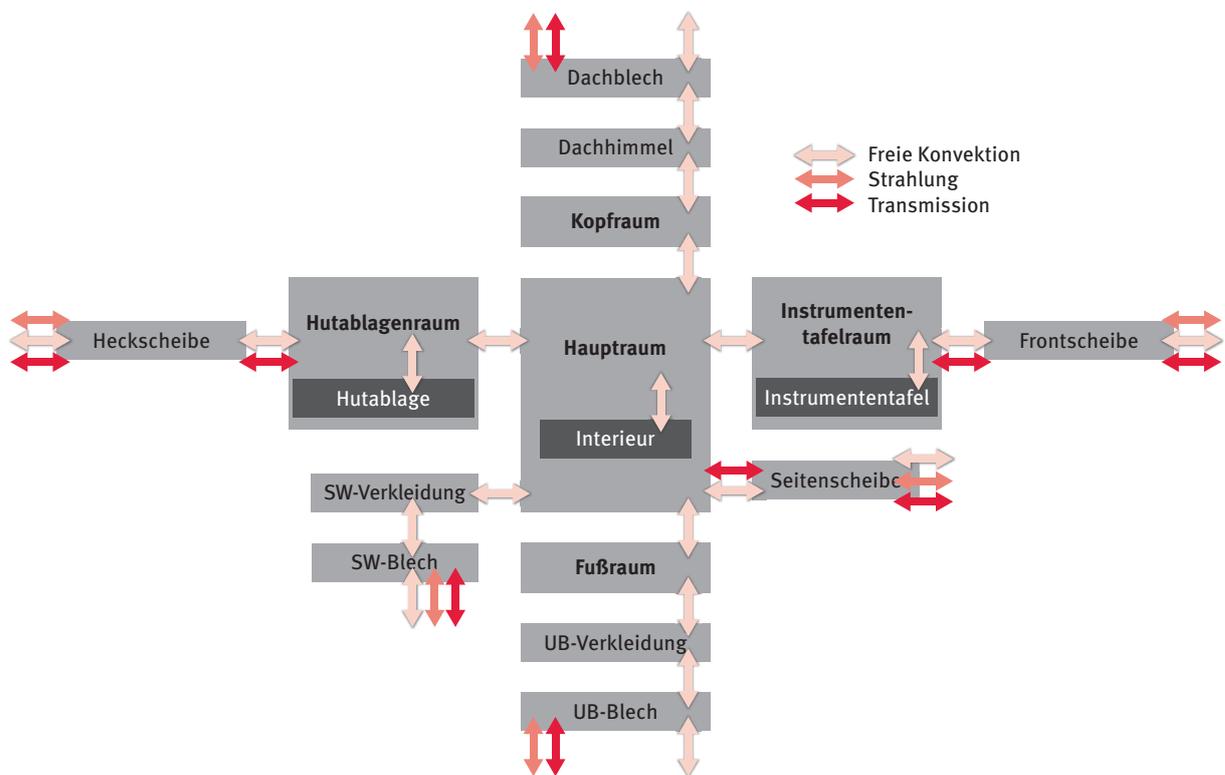


Abb. 2: Aufbau und Darstellung der Wärmebilanz des erstellten 5-Zonen-Modells

durchgeführt werden und das Modell dazu passend parametrisiert werden. Dies ist insofern notwendig, da viele Parameter, wie beispielsweise die spezifischen Wärmekapazitäten und Wärmeleitkoeffizienten, nicht

direkt ermittelbar sind. Weiterhin soll das Modell eine Temperaturregelung der Kabine und um die Einbeziehung der Auftriebsströmungen über den Oberflächen erweitert werden.

### Abstract

In order to gain a reliable estimation of the range of an electric vehicle, it is important to consider the energy consumption of ancillary units. Energetically, the most relevant one is the heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) system, whose consumption depends on the driving scenario and the surrounding conditions. This article introduces a thermodynamic simulation model of the interior of the vehicle in order to calculate the required energy of an HVAC system.

### Zusammenfassung

Für das Energiemanagement und die Reichweiten-schätzung von Kraftfahrzeugen, insbesondere für rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge ist es wichtig, die verbauten Nebenverbraucher energetisch zu betrachten. Der relevanteste Nebenverbraucher im PKW ist das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem, welches abhängig vom Fahrscenario und den Umgebungsbedingungen unterschiedlich hohe Anteile am Energieverbrauch hat. Dieser Artikel stellt ein thermodynamisches Simulationsmodell des Fahrzeuginnenraums vor, welches zur Berechnung des Energiebedarfs einer PKW-Klimatisierung verwendet werden soll.

### Autoren

**Dipl.-Ing. Kurt Kruppok**

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) der Hochschule Karlsruhe und Doktorand am Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

**Felix Claret B.Eng.**

Masterstudierender am Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM) der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Reiner Kriesten**

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Dipl.-Ing. Kurt Kruppok

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft

Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

Institut für Energieeffiziente Mobilität (IEEM)

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [kurt.kruppok@hs-karlsruhe.de](mailto:kurt.kruppok@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-1655

Vermessung  
Geotechnik  
Geoinformatik  
Entwicklung

 **intermetric**  
Das richtige Maß



## DEIN NEUES ARBEITSGERÄT...

Wir suchen Geodäten, Informatiker, Mathematiker, ...

intermetric GmbH | Industriestr. 24 | 70565 Stuttgart | T +49 (711) 780039-2 | [www.intermetric.de](http://www.intermetric.de)

# aFAS - Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen

Christian Holldorb, Tim Reuber und Jan Wachsmann

## Einleitung

Zu den Aufgaben des Straßenbetriebsdienstes auf Bundesautobahnen (BAB) gehören in erster Linie die Streckenwartung, der Winterdienst, die Straßenreinigung, die Grünpflege sowie die Wartung und Instandhaltung der Straßenausstattung.[1] Dabei werden Tätigkeiten wie Mäh-, Kehr- oder Reinigungsarbeiten in mobilen Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) durchgeführt, die sich mit langsamer Geschwindigkeit fortbewegen. Zur Absicherung der Arbeitsfahrzeuge sind bemannte Fahrzeuge mit Absperrtafeln im Einsatz, die jedoch immer wieder in schwere, fremdverschuldete Verkehrsunfälle verwickelt werden, bei denen vor allem Mitarbeiter des Straßenbetriebsdienstes zu Schaden kommen (s. Abb. 1). Um dies zu verhindern, sollen die Absicherungsfahrzeuge zukünftig autonom fahren und so das Risiko eines Personenschadens für die Bediensteten minimieren.

## Motivation

Jährlich werden bundesweit über 100 000 AkD eingerichtet und abgesichert. Dabei liegt die Wahrscheinlichkeit für Straßenwärter an einem Unfall beteiligt zu sein statistisch gesehen „[...] rund 13-mal höher als (bei Bediensteten, d. Verf.) in der gewerblichen Wirtschaft.“[1] Ca. zwei Drittel der Unfälle in AkD werden von LKW verursacht, dabei kommt es in der Regel zu einem seitlichen Aufprall oder einem Aufprall von hinten. 80 % der Straßenwärter, die auf Autobahnen in einen Unfall verwickelt sind, verunglücken in ihren Fahrzeugen. In mehr als 63 % der fremdverschuldeten Unfälle mit Fahrzeugen des Straßenbetriebsdienstes auf Bundesautobahnen sind Absicherungsfahrzeuge/

-geräte betroffen.[2] Ein erhöhtes Risiko besteht für die Mitarbeiter auch beim Aus- und Einsteigen und beim Aufstellen von Sicherungsgeräten.

Vor diesem Hintergrund entwickelt ein Konsortium von acht Partnern aus Industrie, Forschung und Verwaltung, darunter die Hochschule Karlsruhe als Mitinitiator, den Prototyp eines Absicherungsfahrzeugs, das vollautomatisiert einem Arbeitsfahrzeug bei den Arbeiten auf dem Seitenstreifen einer BAB folgt und gegen den fließenden Verkehr absichert. Ziel dieses vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekts „aFAS“ ist damit auch der erstmalige Einsatz eines fahrerlos und vollautomatisiert fahrenden Fahrzeuges im öffentlichen Straßenverkehr. Hierbei sind auch die Ausgestaltung eines umfassenden Sicherheitskonzepts sowie die administrative und rechtliche Umsetzung notwendig, die in diesem Projekt exemplarisch für das vollautomatisierte fahrerlose Fahren erarbeitet werden.



## Projekthalte

Während der Projektlaufzeit werden durch das Projektkonsortium für das fahrerlose Fahren wesentliche Aspekte aus den Bereichen Technik, Normung und Recht betrachtet und weiterentwickelt. Der Hochschule Karlsruhe kommen dabei zwei wesentliche Aufgaben zu: In einem ersten Schritt gilt es Anforderungen und Einsatzbedingungen soweit wie möglich zu quantifizieren und daraus praxisorientierte Einsatzszenarien für die Um-



Abb. 1: Unfall in einer AkD (Foto: Landesbetrieb Straßenbau NRW)



Abb. 2: Fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug (AFA) auf dem Testgelände der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) im Oktober 2016 (Foto: Tim Reuber)

setzungsplanung zu definieren, die bei der Entwicklung des fahrerlos fahrenden Absicherungsfahrzeuges (AFA) berücksichtigt werden (s. Abb. 2). Außerdem werden Anforderungen an die Einsatzstrecken und die Testszenarien während der Pilotphase definiert, um möglichst repräsentative Aussagen erhalten zu können. Im zweiten Schritt ist der Einsatz des entwickelten Fahrzeugs auf den ausgewählten Teststrecken umfassend zu begleiten und zu bewerten. Ziel hierbei ist die Bewertung von Nutzen und Kosten des bundesweiten Einsatzes von autonom fahrenden Absicherungsfahrzeugen für den Straßenbetriebsdienst sowie die Analyse möglicher Einflüsse auf den Verkehrsablauf.

**Anforderungsanalyse und Umsetzungsplanung**

Da die Fahrzeuge in mobilen AkD Ein- und Ausfahrten queren, gegebenenfalls Hindernissen auf dem Seitenstreifen ausweichen sowie Streckenabschnitte ohne Seitenstreifen passieren müssen, sind drei verschiedene Betriebsmodi vorgesehen: vollautomatisiertes Folgen des Arbeitsfahrzeugs auf dem Seitenstreifen bei niedriger Geschwindigkeit (Folgebetrieb, s. Abb. 3a), gekoppeltes Fahren im Bereich von Ein- und Ausfahrten (Koppelbetrieb, s. Abb. 3b) sowie konventionelles Fahren mit Fahrer zur An- und Abfahrt bzw. bei Wechsel auf den rechten Fahrstreifen mit höherer Geschwindigkeit.

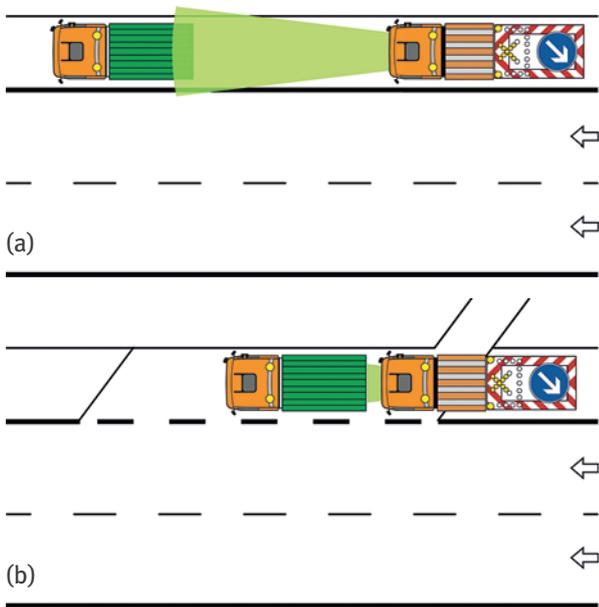


Abb. 3: Folgebetrieb (a) und Koppelbetrieb (b)

Die wesentlichen Leistungen und Tätigkeiten auf dem Seitenstreifen in mobilen AkD sind Mäh-, Kehr- und Reinigungsarbeiten. Unterschieden wird zwischen intervallartigen Tätigkeiten (z.B. Leitpfostenwaschen) und kontinuierlichen Tätigkeiten (z.B. Kehr- und Mäharbeiten). Die Fahrgeschwindigkeiten der Arbeiten unterscheiden sich stark und liegen in der Regel zwischen 3

und 13 km/h. Bei intervallartigen Tätigkeiten ist zudem zu beobachten, dass es von der persönlichen Präferenz des Fahrers des Absicherungsfahrzeugs abhängt, ob er dem Arbeitsfahrzeug mit einem kontinuierlichen oder intervallartigen Geschwindigkeitsverlauf folgt. Zudem konnten bei den Mitfahrten in Hessen, Brandenburg und Bayern Erkenntnisse über weitere Abweichungen vom Regelbetrieb gewonnen werden, sodass weitere Situationen bei den Einsatzszenarien berücksichtigt werden können, die gegebenenfalls zu Problemen bei der Kommunikation zwischen Arbeitsfahrzeug und dem AFA führen könnten (z.B. Staubentwicklung bei Kehrarbeiten). Verifiziert wurden die Beobachtungen und Messungen durch Interviews mit Meistereileitern und Mitarbeitern des Straßenbetriebsdienstes. Im Rahmen dieser Interviews wurde zudem evaluiert, inwiefern sich der Betriebsablauf zwischen den einzelnen Bundesländern und auch zwischen den Meistereien unterscheidet.

Ein weiterer entscheidender Punkt zur Umsetzungsplanung ist die Analyse der Einsatzbedingungen. Für einen reibungslosen Betrieb sind Kenntnisse über die Breite des verfügbaren Seitenstreifens, über die Häufigkeit und Länge von Nothaltebuchten oder vergleichbarer Aufweitungen des Seitenstreifens sowie über Unterbrechungen des Seitenstreifens durch Ein- und Ausfahrten unerlässlich. Weiterhin wurde der Zustand der Fahrbahnbegrenzung (Seitenstreifenmarkierung) umfassend verzeichnet und quantifiziert. Weitere, nicht baulich bedingte Einsatzbedingungen sind temporäre Hindernisse auf dem Seitenstreifen sowie Witterungs- und Fahrbahnzustände. Analysemethoden und Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Das AFA ist im Modus Folgefahrt auf dem Seitenstreifen im Einsatz, der hierfür eine Mindestbreite aufweisen muss. Mit Hilfe der Straßeninformationsdatenbanken der jeweiligen Bundesländer wurden insgesamt 8 113 km Richtungsfahrbahn ausgewertet und die vorhandenen Breiten der Seitenstreifen sowie die Längen der durchgehenden Abschnitte abhängig von der Breite zueinander in Relation gesetzt. Für einen wirtschaftlichen Testbetrieb sind zusammenhängende Abschnitte von mehr als 5 km Länge notwendig. Deren durchschnittliche Länge beträgt zwischen 7 und 8 km, wobei die Anzahl mit zunehmender Standstreifenbreite abnimmt.

Das AFA nutzt zur Trajektorienplanung das vorausfahrende Arbeitsfahrzeug sowie die links von ihm vorhandene Fahrbahnbegrenzung. Deren fehlerfreie Erkennung ist für einen sicheren Betrieb daher ausschlaggebend. Es wurden Videoauswertungen für insgesamt 3 324 km Richtungsfahrbahn durchgeführt, um Aussagen über die Anzahl und Länge der Markierungs-

mängel differenziert nach Mängelkategorien (z.B. Markierungsfehler, Abnutzung, Flickstellen, etc.) treffen zu können. Abbildung 4 zeigt die Anzahl der Mängel pro 1 000 km Richtungsfahrbahn in den ausgewerteten Bundesländern Brandenburg, Bayern und Hessen.

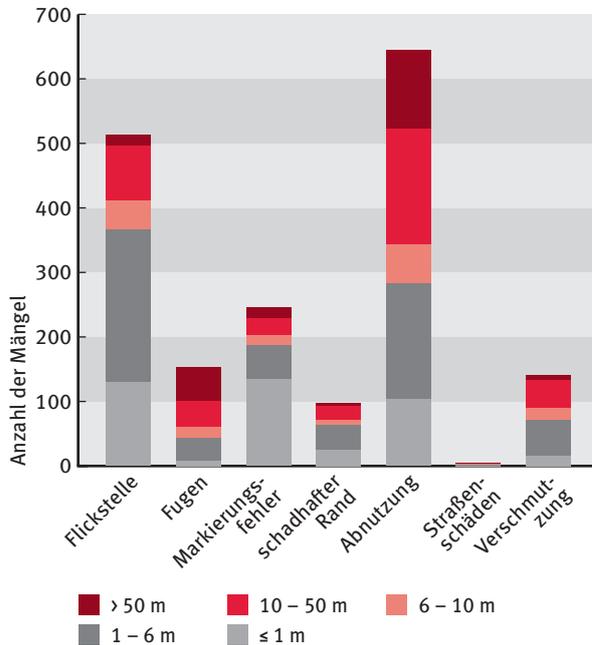


Abb. 4: Durchschnittliche Anzahl der Mängel an der Markierung pro 1 000 km Richtungsfahrbahn in den ausgewerteten Bundesländern

Des Weiteren wurden Art und Häufigkeit temporärer Hindernisse (Pannenfahrzeug, Kadaver, Müll, andere Arbeitsstellen) auf dem Seitenstreifen ausgewertet. Diese müssen entweder beseitigt oder umfahren werden. Hierzu wurde ein Seitenstreifenprotokoll erstellt und durch die Mitarbeiter von neun beteiligten Meistereien für den Zeitraum April bis Oktober 2015 ausgefüllt. Anhand dieser Protokolle lassen sich Zusammenhänge zwischen der durchgeführten Arbeit, den aufkommenden Hindernissen sowie der Folgeaktion erkennen. Im Durchschnitt tritt in jeder Meisterei pro Woche ein temporäres Hindernis auf dem Seitenstreifen auf. Hindernisse, die umfahren werden müssen, sind vielfach auf andere mobile und stationäre Arbeitsstellen, in der Regel AkD, zurückzuführen. Das Umfahren von Pannenfahrzeugen tritt pro Meisterei durchschnittlich einmal im Monat auf.

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich typische Einsatzszenarien definieren. Es stellt sich heraus, dass Arbeitseinsätze wie das Kehren, das Leitpfostenwaschen und die Grasmahd oftmals sehr homogen verlaufen. Wenn der Seitenstreifen ausreichend breit ist und dort keine Hindernisse vorhanden sind, ist ein Betriebszustandswechsel, nur beim Überfahren von Einfädel- und Ausfädelungstreifen not-

wendig. Derartige Einsätze bieten sich daher für die Verwendung des AFA an.

### Bewertung des Einsatzes auf BAB

Der Einsatz des AFA auf BAB kann sich auf den Verkehrsablauf, die Arbeitsabläufe, die Organisation, die Sicherheit und die Kosten des Straßenbetriebsdienstes auswirken. Diese Auswirkungen können entscheidend für die Akzeptanz bei Verkehrsteilnehmern, Mitarbeitern und Verantwortlichen des Straßenbetriebsdienstes sowie für die Markteinführung sein. Die Hochschule Karlsruhe begleitet und bewertet in den kommenden zwei Jahren den Einsatz des AFA auf den ausgesuchten Versuchsstrecken umfassend unter Einbeziehung von Vergleichsuntersuchungen beim Einsatz konventioneller Fahrzeuge.

Um die potenziellen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf und auf die Verkehrssicherheit zu quantifizieren, soll auf verschiedene Erhebungsmethoden zurückgegriffen werden, wie z.B. Messungen, Videobeobachtungen und Befragungen von Verkehrsteilnehmern. Um das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer genau zu analysieren, ist im ersten Schritt eine praxisgerechte Mess- und Erhebungstechnik sowie die Auswertung zu konzipieren und zu testen. Nach erfolgreichen Tests folgt eine umfangreiche Erhebung unter unterschiedlichen Randbedingungen sowohl für konventionelle Fahrzeuge als auch für das AFA. Die so erhobenen Daten sollen unter anderem Aussagen zur Anzahl der Spurwechselvorgänge, dem seitlichen Abstand der Verkehrsteilnehmer zum Absicherungsfahrzeug sowie dem Einscheren vor bzw. hinter dem gekoppelten Arbeitsfahrzeug/Absicherungsfahrzeug im Bereich der Ein- und Ausfahrten liefern.

Ziel der Erhebungen und Auswertungen ist eine bundesweite Nutzen-Kosten-Bewertung für den Straßenbetriebsdienst, auch unter Berücksichtigung weiterer möglicher Anwendungsfälle, die dort in Betracht kommen können. Weiterhin soll überprüft werden, ob keine negativen Auswirkungen eines fahrerlosen Betriebs auf das Verkehrsgeschehen bestehen.

### Literatur

- [1] C. Lippold (Hrsg.), *Der Elsner – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen*, Ausgabe 2015, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg (2014).
- [2] R. Roos, M. Zimmermann, S. B. Riffel, T. Cypra, *Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen*, in: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Bergisch-Gladbach, V170 (2008).

### Abstract

Safety trucks, used in short-term roadworks, are frequently involved in serious accidents caused by a third party. To improve the safety of the maintenance personnel, a prototype of a self-driving safety truck is being developed by the aFAS-project. The Karlsruhe University of Applied Sciences is involved as one of the initiators of the project as well as a part of a consortium consisting of eight partners. The main contribution is to analyze the requirements of the vehicle and the test tracks as well as to evaluate the impact on traffic flow and road maintenance service.

### Zusammenfassung

Absicherungsfahrzeuge, die für Tätigkeiten in mobilen Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) im Einsatz sind, werden immer wieder in schwerwiegende fremdverschuldete Unfälle verwickelt. Um die Sicherheit für die Mitarbeiter des Straßenbetriebsdienstes zu erhöhen, wird im Projekt aFAS der Prototyp eines autonom fahrenden Absicherungsfahrzeugs (AFA) entwickelt. Als Mitinitiator des Projekts und als Teil eines Konsortiums von acht Projektpartnern leistet die Hochschule Karlsruhe ihren Beitrag bei der

Analyse der Anforderungen an das Fahrzeug und die Teststrecken sowie bei der Evaluierung der Auswirkungen auf Verkehrsablauf und Betriebsdienst.

### Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorb**

Professor an der Fakultät für Architektur und Bauwesen und Projektleiter aFAS am Institut für Verkehrsplanung und Infrastrukturmanagement (IVI) der Hochschule Karlsruhe

**Tim Reuber M.Eng.**

**Jan Wachsmann M.Eng.**

Akademische Mitarbeiter am Institut für Verkehrsplanung und Infrastrukturmanagement (IVI) der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorb  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Architektur und Bauwesen  
Institut für Verkehrsplanung und Infrastrukturmanagement (IVI)  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: christian.holldorb@hs-karlsruhe.de

**Wir lassen unsere Ideen raus!**

**Alles aus einer Hand – vom Layout bis zum fertigen Produkt**

**VMK**  
Verlag für Marketing und Kommunikation GmbH

Faberstrasse 17 - 67590 Monsheim  
fon ++49 6243 909 0 - fax ++49 6243 909 400  
info@vmk-verlag.de - www.vmk-verlag.de

# Entwicklung eines gemischansaugenden magerbetriebenen Erdgasmotors zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte unter Verwendung numerischer und experimenteller Methoden

Jürgen Bauer, Waldemar Rieb, Stefan Fieg, Denis Neher und Maurice Kettner

## Einleitung

In Blockheizkraftwerken finden überwiegend homogen magerbetriebene Erdgasmotoren Verwendung, die mit einer späten Verbrennungsschwerpunktlage geringe  $\text{NO}_x$ -Emissionen und gleichzeitig zufriedenstellende Wirkungsgrade erzielen. Orientieren sich Anlagenhersteller aktuell an den Grenzwerten der TA-Luft, gelten ab 2018 für Aggregate mit  $50 \text{ kW}_{el}$  nach der EU Verordnung 813/2013 [1] deutlich strengere  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte, die etwa der Hälfte der TA-Luft-Grenzwerte entsprechen. Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, können durch weitere Ladungsverdünnung zukünftige Grenzen zwar eingehalten werden, allerdings ist dies aufgrund zunehmender Verschleppung der Verbrennung und erhöhter zyklischer Schwankungen mit einer Abnahme des inneren Wirkungsgrads verbunden. Beim Saugmotor nimmt zudem die Nutzleistung ab, wodurch sich die Reibungsverluste anteilig erhöhen und folglich der effektive Wirkungsgrad gemindert wird. Im Forschungsbereich Motorentechnik der Hochschule Karlsruhe wurden in Kooperation mit der Eberhard Hoeckle GmbH Maßnahmen zur Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Wirkungsgrad und  $\text{NO}_x$ -Emissionen an einem Vierzylinder-Erdgasmotor untersucht.

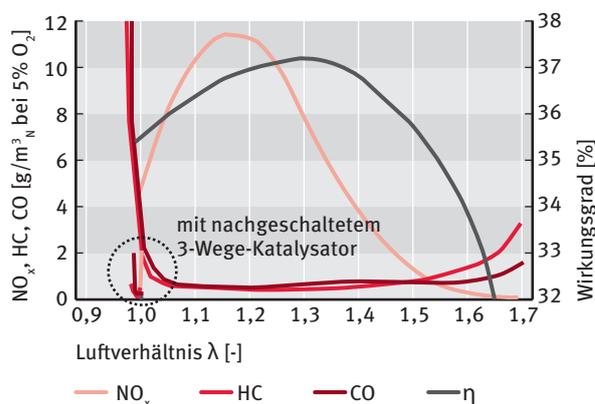


Abb. 1: Wirkungsgrad und Emissionen bei verschiedenen Luftverhältnissen [2]

## Versuchsprüfstand

Bei dem verwendeten Versuchsträger handelt es sich um einen gemischansaugenden homogen magerbe-

triebenen Vierzylinder-Otto-Gasmotor HMG 434 der Firma Hoeckle mit zwei Ventilen je Zylinder. Der Hub beträgt 134 mm, die Bohrung 108 mm, womit sich der Hubraum auf 4,9 l beläuft. Die Gemischentzündung erfolgt durch eine ungespülte Vorkammerzündkerze. Die geometrische Verdichtung beträgt im Serienzustand 13,3. Während des Vorhabens wurde eine Anhebung auf 15,2 realisiert. Für den Netzbetrieb bei 50 Hz wird eine Nenndrehzahl von 1500 1/min eingestellt, die elektrische Leistung beträgt dabei 37 kW.

Gegenüber der Serienkonfiguration wurde der Versuchsträger mit einer gekühlten Abgasrückführung ausgestattet. Eine konstante Rückführtemperatur war durch die Konditionierung des Abgases gegeben. Der gesamte Versuchsaufbau ist auf Abbildung 2 ersichtlich.

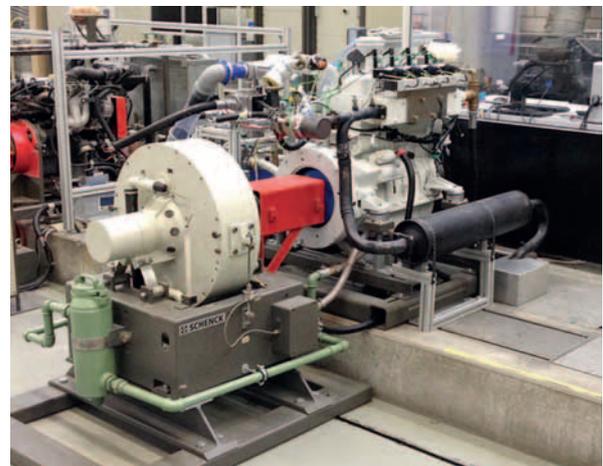


Abb. 2: Versuchsprüfstand an der Hochschule Karlsruhe (Foto: Stefan Fieg)

Neben einer Nieder- und Hochdruckindizierung wurden für die Untersuchungen Temperaturmessstellen im Ansaugbereich, dem Zylinderkopf und im Abgasbereich angebracht. Die Kraftstoffverbrauchsmessung erfolgte über das Prinzip der thermischen Durchflussmessung am Erdgasanschluss des Prüfstands. Zur Analyse der Abgaskomponenten diente der institutseigene Abgasmessturm, der die  $\text{NO}_x$ -Emissionen über ein Prozess-Photometer erfasst.

**Ansatz zur Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Wirkungsgrad und NO<sub>x</sub>-Emissionen**

Gute Wirkungsgrade zur Wahrung der Anlagenwirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken bei gleichzeitig geringen Emissionen stellen heutzutage einen wichtigen Zielkonflikt dar, der im vorliegenden Projekt entschärft wurde. Grundlage bildete die Anhebung des Verdichtungsverhältnisses von 13,3 auf 15,2, die zunächst jedoch durch den Anstieg der Kompressionsendtemperatur zu hohen Verbrennungstemperaturen und einer erhöhten NO<sub>x</sub>-Bildung führt. Um dieser entgegenzuwirken und gleichzeitig Wirkungsgradeinbußen zu vermeiden, wurden Einzelmaßnahmen wie Ladungswechseloptimierung, intensivierte Ladungsbewegung sowie eine gekühlte Abgasrückführung untersucht.

**Einsatz numerischer Methoden zur Motorprozessoptimierung**

Gasmotoren im niedrigen Leistungsbereich werden zu meist von aufgeladenen Dieselaggregaten abgeleitet, von denen die Ventilsteuerzeiten häufig unverändert übernommen werden. Bei der Anwendung als Saugmotor verbleibt dabei ein hoher Restgasgehalt im Brennraum, der die Frischladungstemperatur anhebt. Infolgedessen ergeben sich erhöhte Verbrennungstemperaturen, die mit einer vermehrten Bildung von Stickoxiden verbunden sind. Zur Absenkung der Temperaturen wurde eine Ladungswechseloptimierung durchgeführt und für den gemischansaugenden Betrieb angepasste Steuerzeiten ermittelt. Anhand der geometrischen Daten von Brennraum, Ansaug- und Abgasbereich sowie experimentell ermittelter Durchflusszahlen des Ein- und Auslasskanals wurde zunächst ein 1D-Simulationsmodell erstellt und anhand motorischer Messdaten validiert. Im Zuge einer Simulationsstudie wurden Ventilhubkurven ermittelt, die einen geringeren Restgasgehalt und ein verbessertes Füllungsverhalten aufweisen, was anhand der schwächer ausgeprägten Nulldurchgänge der Einlass- und Auslassmassenströme auf Abbildung 3 zu erkennen ist. Dies lässt sich auf eine geringere Ventilüberschneidungsphase durch Verkürzung der Einlass- und Auslassöffnungszeiten zurückführen, die das Zurücksaugen von heißem Abgas und die Rückströmung von Frischgemisch in den Einlass verringern.

Anhand eines Mehrkörpersimulationsmodells des Ventiltriebs wurden die Zusammenhänge der dynamischen Belastungen dargestellt, um auf deren Grundlage die optimierten Ventilhubkurven in Schleifkoordinaten für eine neue Nockenkontur zu überführen. Die Umsetzung konnte durch Modifikation der Seriennockenwelle erfolgen. In den nachfolgenden motorischen Untersuchungen wurde der Restgasgehalt durch Analyse der Nieder- und Hochdruckdaten mit dem von Spicher

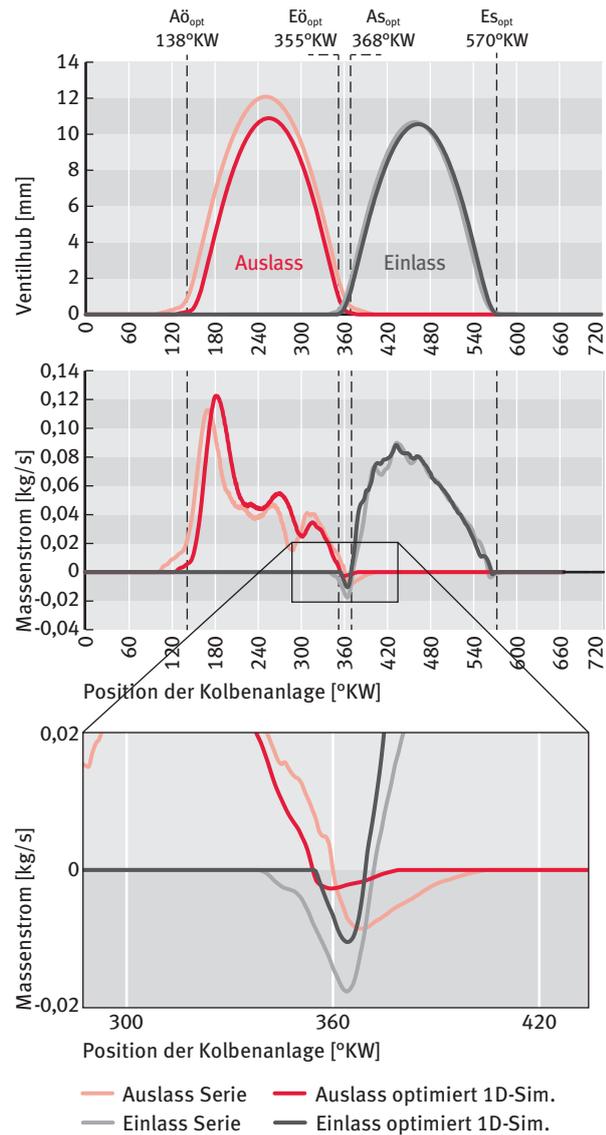


Abb. 3: Optimierte Ventilhubkurven sowie simulierte Einlass- und Auslassmassenströme während der Ventilüberschneidungsphase

und Bargende entwickelten Restgasmodell im instituts-eigenen Druckanalyseprogramm bestimmt. Am mit optimierten Steuerzeiten ausgeführten Motor zeigte sich eine Erhöhung der Frischgasmasse von 2,4 % bei gleichzeitiger Restgasminimierung von 1,8 %.

Die Anhebung des Verdichtungsverhältnisses von 13,3 auf 15,2 bildete den nächsten Schritt des Vorhabens und erfolgte durch eine Veränderung der Kolbenform. Im Hinblick auf den Einsatz der Abgasrückführung und die dadurch verlangsamte Verbrennung wurden Maßnahmen ergriffen, um die Brenngeschwindigkeit wieder zu erhöhen. Daher wurde im Zuge der Verdichtungserhöhung eine Optimierung der Kolbengeometrie zur Beschleunigung der Flammenfront vorgenommen. Hierzu wurde aus der Einlass-, Brennraum- und Auslassgeometrie ein 3D-CFD-Modell zur Simulation

der Zylinderinnenströmung erstellt, dem als Randbedingungen die Ergebnisse der 1D-Simulation sowie experimenteller Versuche übergeben wurden. Es wurde eine gegenüber dem Serienkolben abweichende Geometrie mit größeren Quetschflächen und schärferen Übergängen im Bereich der Kolbenmulde entwickelt. Dies begünstigt den Zerfall der durch den Drallkanal gerichteten Einlassströmung und ermöglicht eine stark turbulente Ladungsbewegung. In Folge des hohen Turbulenzniveaus erfolgt eine beschleunigte Umsetzung des Gemischs, die eine frühere Schwerpunktlage ermöglicht. Abbildung 4 zeigt hierbei die neue Kolbengeometrie sowie die gesteigerte Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Brennraums im oberen Totpunkt (OT).

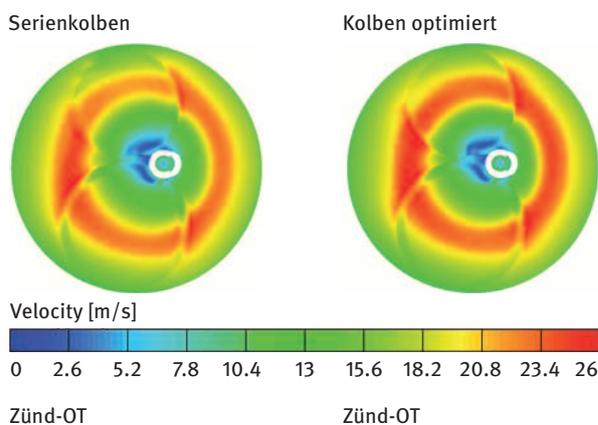


Abb. 4: Kolbengeometrie und Geschwindigkeitsverteilung des Zünd-OT in der Serienkonfiguration sowie in der optimierten Variante

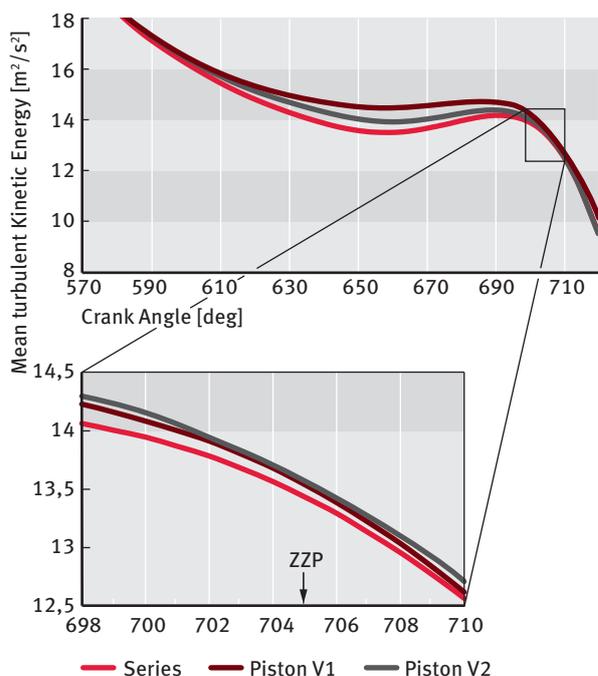


Abb. 5: Turbulente kinetische Energie während der Verdichtung für Serienkolben und optimierte Variante

Ein weiteres Maß für die Bewertung der Ladungsbewegung stellt die turbulente kinetische Energie (TKE) dar, welche während der Verdichtung gesteigert werden konnte (s. Abb. 5).

Mit der Anhebung des Verdichtungsverhältnisses auf 15,2 konnte eine Steigerung des indizierten Wirkungsgrads erzielt werden, der allerdings zunächst mit einer erhöhten Verbrennungstemperatur und  $\text{NO}_x$ -Bildung einhergeht.

### Experimentelle Untersuchung der Sekundärmaßnahme Abgasrückführung

Um die Stickoxidbildung zu verringern wurde der Versuchsträger mit einer Abgasrückführungsstrecke ausgestattet, welche die Wärmekapazität des Frischgemischs signifikant erhöht und folglich die Verbrennungstemperatur absenkt. Zur Ermittlung des Potenzials des Systems wurden motorische Versuche mit einer Variation der rückgeführten Abgasmenge zwischen 0 und 20 % bei verschiedenen mageren Luftverhältnissen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten mit einer konstanten Abgastemperatur von  $80^\circ\text{C}$ . Bei einer rückgeführten Abgasmenge von 20 % der Verbrennungsluft konnte gegenüber der Konfiguration ohne Abgasrückführung die Erfüllung der zukünftigen Grenzwerte mit einer gleichzeitigen Verbesserung des indizierten Wirkungsgrads erzielt werden.

### Ergebnisse

Durch das enge Zusammenspiel zwischen Versuch und Simulation, wie 1D-CFD, 3D-CFD und Mechaniksimulation, konnte mit der sequentiellen Ergreifung von Einzelmaßnahmen der Zielkonflikt zwischen Wirkungsgrad und  $\text{NO}_x$ -Emissionen entschärft werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte für die Motorkonfiguration mit optimiertem Ladungswechsel, einem Verdichtungsverhältnis von 15,2 und einer gekühlten Abgasrückführung sowohl aktuell angewandte  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte (TA-Luft) als auch zukünftige Bestimmungen ( $1/2$  TA-Luft) im Magerbetrieb innermotorisch eingehalten werden.

Die Ergebnisse der abschließenden motorischen Untersuchungen können Abbildung 6 entnommen werden. Gegenüber dem Serienaggregat wurde unter Einhaltung der TA-Luft-Grenzwerte eine Steigerung des effektiven Wirkungsgrads von 35,4 % auf 37 % erzielt. Die zukünftigen Grenzwerte ( $1/2$  TA-Luft) konnten ohne Einbußen im effektiven Wirkungsgrad (35,5 %) und der effektiven Leistung (38 kW) eingehalten werden.

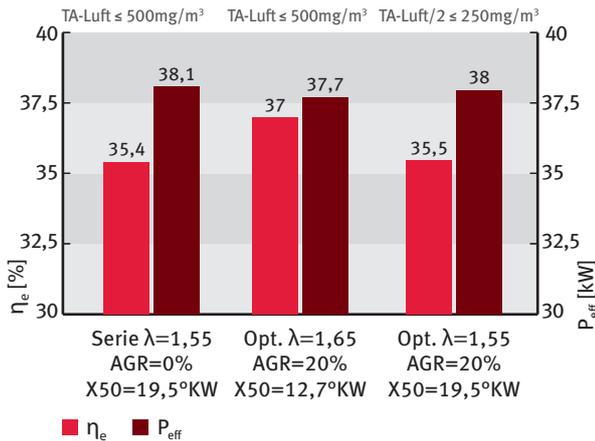


Abb. 6: Erzielte Wirkungsgrade  $\eta_e$  und Leistungen  $P_{eff}$  für aktuelle (TA-Luft) und zukünftige (1/2 TA-Luft)  $NO_x$ -Grenzwerte

**Ausblick**

Im Rahmen einer Optimierung der Motormechnik ist angedacht, die Triebwerksverluste durch eine Anpassung der Ölpumpe sowie der Bauteile des Ventiltriebs, insbesondere der Ventildfedern, zu reduzieren. Mit der Anhebung des mechanischen Wirkungsgrads wird eine Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzen bei gleichzeitiger Verbesserung der effektiven Leistung ermöglicht.

**Literatur**

- [1] Europäische Kommission, Verordnung (EU) 813/2013, *Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten*, Brüssel, 2013.
- [2] M. Auer, *Erstellung phänomenologischer Modelle zur Vorausberechnung des Brennverlaufes von Magerkonzept-Gasmotoren*, Dissertation, TU München, 2010.

**Abstract**

In order to improve the trade-off between engine efficiency and  $NO_x$  emissions of lean-burn natural gas powered engines (used in cogeneration units), the Institute of Refrigeration, Air conditioning and Environmental engineering at the Karlsruhe University of Applied Sciences carried out a thorough study on a four-cylinder gas engine. The compression ratio was increased from 13.3 to 15.2 by applying numerical and experimental methods to optimize gas exchange process and the motion of in-cylinder charge as well as to apply cooled exhaust gas recirculation. As a result, the engine could comply with future  $NO_x$  emission requirements while maintaining its efficiency.

**Zusammenfassung**

Zur Entschärfung des Zielkonflikts von Wirkungsgrad und  $NO_x$ -Emissionen erdgasbetriebener Magermotoren, die in Blockheizkraftwerken Verwendung finden, wurden umfassende Untersuchungen an einem Vierzylinder-Erdgasmotor am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik der Hochschule Karlsruhe durchgeführt. Unter Verwendung numerischer und experimenteller Methoden wurde das Verdichtungsverhältnis von 13,3 auf 15,2 erhöht, der Ladungswechsel und die Ladungsbewegung optimiert sowie eine gekühlte Abgasrückführung integriert. Hierdurch können zukünftige Emissionsvorgaben erfüllt und der elektrische Wirkungsgrad eingehalten werden.

**Autoren**

- Waldemar Rieb M.Sc.
- Jürgen Bauer M.Sc.
- Stefan Fieg M.Sc.
- Denis Neher M.Sc.

Akademische Mitarbeiter am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der Hochschule Karlsruhe

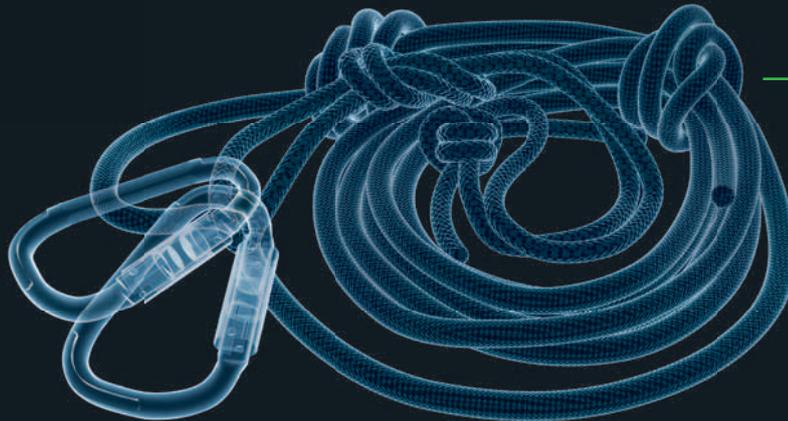
Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

**Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner  
 Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
 Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
 Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik  
 Moltkestr. 30  
 76133 Karlsruhe  
 E-Mail: maurice.kettner@hs-karlsruhe.de  
 Telefon: 0721 925-1845

PERFEKT, UM NACH OBEN ZU KOMMEN:  
IHR BERUFSEINSTIEG BEI EINEM MARKTFÜHRER.



**-4°C** erzeugen BITZER  
Verdichter in Produkttests,  
um sicherzustellen, dass  
Kletterhaken nicht brechen.

## EINSTIEGSPROGRAMM FÜR INGENIEURE (M/W)

Kälte- und Klimatechnik leisten weltweit einen unverzichtbaren Beitrag, zum Beispiel in der Gebäudeklimatisierung oder der Transportkühlung. Das Herzstück dabei: Verdichter von BITZER. Rund um den Globus setzen circa 3.400 Mitarbeiter täglich alles daran, dass sich unsere Kunden auf BITZER Qualität und Leistung verlassen können. Als führendes Unternehmen der Branche hat BITZER das Ziel, ingenieurwissenschaftliche Schlüsselpositionen in den Abteilungen „Application Engineering and Product Performance“ sowie „Sales International“ mit Mitarbeitern aus den eigenen Reihen zu besetzen.

Ab April 2017 erhalten Sie innerhalb des 18-monatigen Ausbildungsprogramms durch wechselnde Abteilungseinsätze an unseren Standorten Sindelfingen, Rottenburg und Schkeuditz sowie in einer ausländischen Tochtergesellschaft die Chance, Ihre fachliche und soziale Kompetenz weiterzuentwickeln.

### AUSBILDUNGSSCHWERPUNKTE

Sie eignen sich fundierte Produkt- und Anwendungskennnisse in enger Zusammenarbeit mit Ihren Mentoren an, führen Marktanalysen sowie Vertriebswegeuntersuchungen durch und beraten sowohl nationale als auch internationale Kunden. Im Troubleshooting vor Ort arbeiten Sie ebenso mit wie in der Produktentwicklung, im Versuch und in der Qualitätssicherung. Außerdem lernen Sie Fertigungsabläufe und -verfahren sowie die Fertigungsvorbereitung und -planung kennen.

### VORAUSSETZUNGEN

Sie haben ein ingenieurwissenschaftliches Studium mit Schwerpunkt Kälte-, Klima- und Umwelttechnik abgeschlossen und verfügen über Fach- und Branchenkenntnisse aus einer Erstausbildung, einem Praktikum bzw. einer Bachelor- oder Masterthesis? Sprechen Sie darüber hinaus sehr gut Englisch und haben Sie gute MS-Office-Kenntnisse? Wenn Sie außerdem noch hohes Engagement sowie Team- und Kommunikationsfähigkeit mitbringen und bereit sind, im Ausland zu arbeiten, sollten wir uns kennenlernen!

### KONTAKT

Interessiert? Dann freuen wir uns über Ihre aussagekräftige Bewerbung per E-Mail an:  
recruiting@bitzer.de // BITZER Kühlmaschinenbau GmbH // Human Resources //  
Eschenbrünnelestraße 15 // 71065 Sindelfingen // www.bitzer.de  
Mark Harris beantwortet Ihnen gerne erste Fragen: Tel +49 (0)70 31 932-130.



DAS HERZ DER FRISCHE



Heraeus

# ICH GESTALTE ZUKUNFT. DURCH INTENSIVE FORSCHUNG.

**TIM PROTZMANN** ist Entwicklungsingenieur bei Heraeus. Schon während seines Maschinenbaustudiums hat er sich intensiv mit dem Thema Additive Fertigung beschäftigt. Bei Heraeus kann er noch tiefer in die Materie eintauchen. Denn hier sind seine Kollegen und er das entscheidende Bindeglied zwischen Idee und Umsetzung. Die Möglichkeit, an Zukunftsthemen zu forschen, versetzt dem Berufseinsteiger einen großen Motivationsschub. Tim Protzmann ist nicht die Ausnahme der Regel: Heraeus fordert und fördert Berufseinsteiger gleichermaßen.

Heraeus zählt in Deutschland zu den Top 100 Arbeitgebern des Universum Student Survey und Professional Survey.

[www.heraeus.de/karriere](http://www.heraeus.de/karriere)

**OPEN SPACE. FOR OPEN MINDS.®**

# Dynamische Companion-Technologien und mobile Systeme im öffentlichen Verkehr

Regina Schlindwein, Christine Keller und Thomas Schlegel

Der Einsatz mobiler Endgeräte im öffentlichen Verkehr (ÖV) bietet zahlreiche Möglichkeiten, Fahrgäste und Kunden in ihrer Mobilität zu unterstützen und ihnen neue hilfreiche Dienste anzubieten. Es können kundenorientierte Dienste entwickelt werden, die sich an die individuellen Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer anpassen lassen. Das Institut für Ubiquitäre Mobilitätssysteme (IUMS) der Hochschule Karlsruhe hat im Rahmen der beiden Projekte „DYNAMO“ und „DynAPSys“ dynamische Companion-Technologien entwickelt, die den Nutzer auf seiner Wege- und Reisekette im öffentlichen Personenverkehr begleiten und die ihn dabei unterstützen, seine Routenplanung und Zielerreichung zu optimieren.

## DYNAMO – Dynamische, nahtlose Mobilitätsinformation

Im Forschungsprojekt DYNAMO, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), wurde auf die nahtlose Reisebegleitung von Tür zu Tür fokussiert. Im Projekt wurden verschiedene Fragestellungen rund um die nahtlose Reisebegleitung bearbeitet.

Das IUMS war dabei maßgeblich an der Erarbeitung von neuen Bedienkonzepten für ÖV-Apps und der Einbindung von Social Media in mobile Applikationen beteiligt. Die Social Media Einbindung vereinfacht die Kommunikation zwischen Fahrgästen und Verkehrsunternehmen sowie die Kommunikation der Fahrgäste untereinander durch den Einsatz von sozialen Netzwerken.

Um diesen Informationsaustausch auch über eine mobile ÖV-Applikation zu ermöglichen, wurde eine Metaplatzform entwickelt, die als Schicht zwischen existierenden sozialen Netzwerken und einer mobilen Anwendung dient. Um eine breite Zielgruppe zu erreichen, vereint die Metaplatzform verschiedene soziale Netzwerke und bündelt die Informationen aller sozialen Kommunikationskanäle, auf die der Fahrgast zugreifen kann. So sind in der prototypischen Umsetzung im Projekt beispielsweise sowohl Twitter als auch Facebook integriert. Mit der Metaplatzform können Verbindungsauskunft und -austausch sowie Anfrage- und Feedbackmanagement gemeinsam abgedeckt werden.

Besonders bei unvorhersehbaren Störungen können Fahrgäste meist schneller reagieren als das Verkehrs-

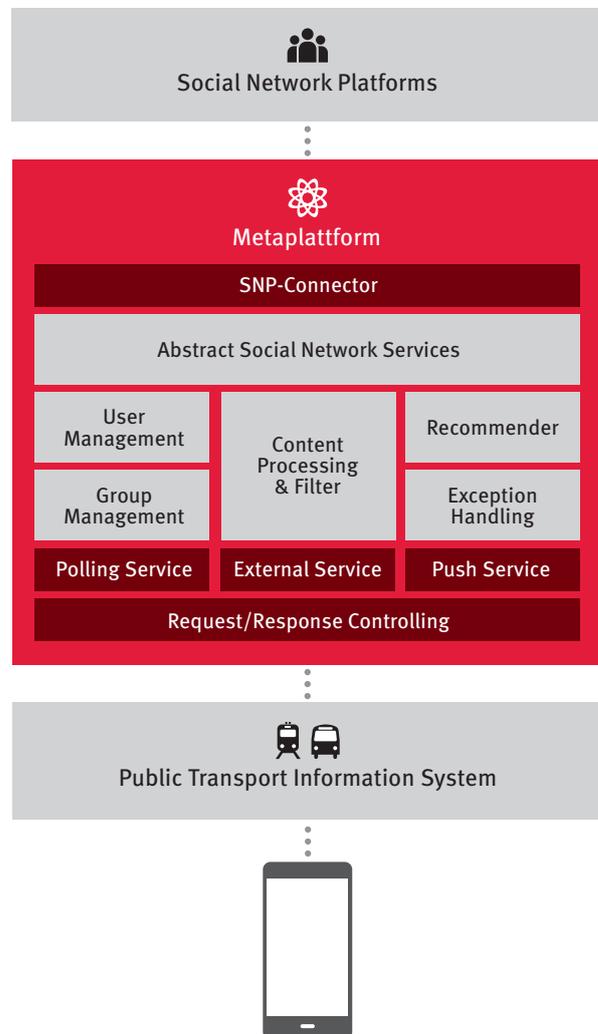


Abb. 1: Systemübersicht zur Metaplatzform

unternehmen selbst; sie unterstützen auf diese Weise die Informationsbereitstellung. Zudem können Fahrgastmeldungen, beispielsweise über Störungen oder Verspätungen, gebündelt werden. Für den einzelnen Fahrgast ermöglichen diese Informationen eine schnelle individuelle Alternativplanung. Die Informationen des Fahrgasts (z. B. Ortsinformationen) können mit Informationen anderer Fahrgäste verknüpft und anschließend auch den Betreibern in geeigneter Form dargestellt werden. Der Verkehrsbetreiber erhält dadurch einen Gesamtüberblick über vorliegende Beeinflussungen und gewinnt planungsrelevante Daten.

Um einzelne Funktionen im Kontext des öffentlichen

Personenverkehrs testen zu können, wurde im Rahmen des Projekts die App „socialPT“ als Schnittstelle zum Fahrgast prototypisch umgesetzt. Die Applikation setzt dabei auch die im Projekt erarbeiteten, auf mobile Systeme spezialisierten Bedienkonzepte um. Neben typischen Funktionen existierender mobiler Fahrgastauskunftssysteme wurden in der App auch verschiedene Dienste der Metaplattform umgesetzt. Der Fahrgast kann sich bei einem oder mehreren sozialen Netzwerken über die App anmelden. Um sich über aktuelle Informationen eines Verkehrsunternehmens zu informieren, ist in der Applikation der News-Stream des entsprechenden Unternehmens vorkonfiguriert. Beim Verfassen einer neuen Meldung durch den Fahrgast werden die Kontakte des Nutzers aus den verbundenen Netzwerken angezeigt. Je nach Kategorisierung der Nachricht können Freunde oder das Verkehrsunternehmen informiert werden.

Um die Akzeptanz der Nutzung von Social Network Funktionen zu identifizieren, wurde eine Evaluation auf Basis einer Online-Umfrage sowie einer qualitativen Studie durchgeführt. Dafür wurde die prototypische Anwendung socialPT genutzt. Insgesamt zeigte sich seitens der Probanden ein aufgeschlossenes und positives Bild für die Einbindung von Social Network Funktionen in eine Applikation für den öffentlichen Verkehr; eine vollständige Integration aller Services eines sozialen Netzwerks ist jedoch nicht nötig.

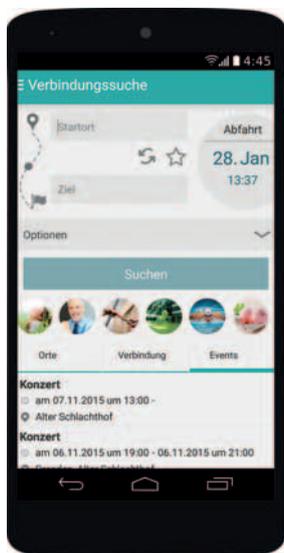
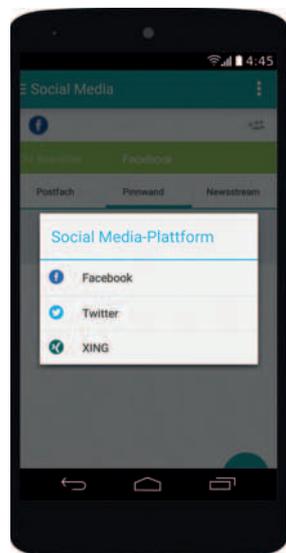


Abb. 2: Prototyp socialPT



ÖV-Angebote erreichen möchte, trägt es auch den wirtschaftlichen Anforderungen der Verkehrsunternehmen Rechnung. Das im Projekt entwickelte Agendaplanungssystem DynAPSys verbindet die Planung von persönlichen Terminen und Aufgaben (Arztbesuch, Einkauf etc.) mit der individuellen Routenplanung zu einer automatisch generierten Agenda, die den Tagesablauf des Fahrgasts optimiert. So wird auf Basis der Tagesplanung mit Terminen und Aufgaben eine Mobilitätsplanung errechnet, die den Nutzer durch den Tag begleitet. Das Hintergrundsystem DynCloud liefert dem Nutzer die für ihn relevanten Informationen (z.B. Nahverkehrsangebote, Park & Ride, Öffnungszeiten öffentlicher Einrichtungen) stets aktuell über die mobile Applikation DynApp. Neben der Fahrgastinformation bietet DynAPSys einen Rückkanal vom Fahrgast zum Verkehrsunternehmen und ermöglicht so eine bedarfsorientierte Fahrten- und Auslastungsanpassung sowie eine direkte Kommunikation mit dem Fahrgast. Insbesondere in ländlichen Räumen kann so die Einsatz- und Fahrtenplanung seitens der ÖV-Unternehmen optimiert werden.

Aus technischer Sicht ist DynAPSys ein ambitioniertes Vorhaben: Informationen aus verschiedenen Quellen müssen interpretiert und den Nutzern zugeführt werden. Insbesondere die Integration der Daten verschiedener Drittanbieter wie Kinos, Fahrradverleihe oder Wetterdienste erschweren eine einheitliche Beschreibung der Daten mit herkömmlichen Mitteln.



Abb. 3: Screenshot der DynApp

Deshalb nutzt DynAPSys semantische Modelle, um Fahrgäste, Drittanbieter, ÖV-Unternehmen und jedwede Information, die diese benötigen oder bereitstellen, abzubilden. Der Einsatz semantischer Technologien erlaubt es, alle Nutzer des Systems abstrakt zu beschreiben und einzuordnen. Damit können auch neue Drittanbieter jederzeit zu DynAPSys hinzugefügt werden, ohne softwareseitige Änderungen nötig zu machen.

### DynAPSys – Dynamisches Agendaplanungssystem

Im Projekt DynAPSys, ebenfalls gefördert durch das BMWi, wurde das Ziel verfolgt, den Fahrgästen eine möglichst individuelle Routenplanung zu bieten. Da das Konzept gleichzeitig eine höhere Auslastung einzelner

Um den Informationsfluss zwischen allen Nutzern und den Komponenten zu ermöglichen, werden Informationen ausschließlich mithilfe eines sogenannten Publish/Subscribe (kurz: Pub/Sub) Systems ausgetauscht. Pub/Sub entkoppelt die Absender der Nachrichten von ihren Empfängern:

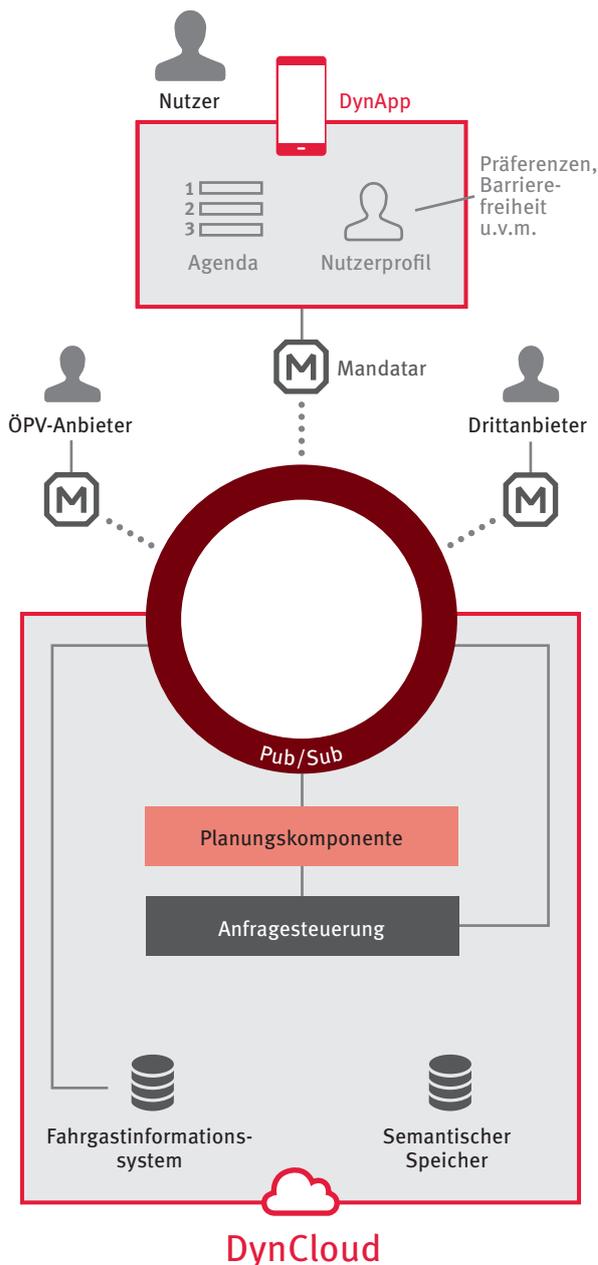


Abb. 4: Technische Realisierung von DynAPSys

Es ist für den Absender nicht mehr nötig, eine Nachricht an einen spezifischen Empfänger zu adressieren. Vielmehr melden potenzielle Empfänger bzw. deren mobile Applikationen ein Interesse an bestimmten Nachrichten an (z.B.: „Ich interessiere mich für das Wetter in Karlsruhe.“). Meldet nun ein Wetterdienst Regen für Karlsruhe an das Pub/Sub, werden alle Nutzer, die ein entsprechendes Interesse angemeldet haben, diese Mitteilung erhalten. Schließlich wird jeder Nutzer des Systems durch einen individuell auf ihn zugeschnittenen Mandatar repräsentiert, welcher dem jeweiligen Nutzer als Schnittstelle zu DynAPSys dient. Dadurch muss DynAPSys z.B. die Telefonnummer eines Nutzers nicht selbst kennen, da das System

ausschließlich mit den Mandataren der jeweiligen Nutzer kommuniziert und die Mandatare über die mobile Applikation DynApp mit dem Nutzer in Verbindung stehen. Der Mandatar erfüllt damit nicht nur Privacy- und Datenschutz-relevante Funktionen, sondern dient dem Nutzer als mobiler Companion, d.h. als mobiler, individueller Reisebegleiter.

### Dynamische Companion-Technologien für den öffentlichen Verkehr

Die Allgegenwärtigkeit von Smartphones und mobilen Applikationen verstärkt und unterstützt den Trend hin zur hochindividuellen Mobilität, in der die Nutzer verschiedene Mobilitätsangebote bedarfsgerecht und ad hoc kombinieren können. Zur Unterstützung solcher anpassbarer und situativ nutzbarer Mobilitätsdienste sind neue dynamische Technologien nötig, die die Integration verschiedenster Anbieter – von Mobilitätsanbietern, über Drittanbieter, die von der Mobilität ihrer Kunden profitieren, bis hin zu Social Media Plattformen – einfach ermöglichen. Am IUMS werden dafür unter anderem Companion-Technologien zur Begleitung der Nutzer in ihrer Mobilität entwickelt.



## Be in it!

**Informatiker (m/w), Ingenieure (m/w) und Kaufleute (m/w)** für weltweite Telematikprojekte gesucht!

Sie studieren Informatik, Elektrotechnik, Nachrichtentechnik, Wirtschaftsingenieurwesen oder Betriebswirtschaft? Sie sind begeisterungsfähig, arbeiten zielorientiert und sprechen gut Englisch? Dann freuen wir uns auf Sie als:

- Studentische Hilfskraft (m/w)
- Praktikant (m/w)
- Thesis-Student (m/w)
- Hochschulabsolvent (m/w)

Die Basis unseres Erfolgs legen wir in Karlsruhe – mit attraktiven Arbeitsplätzen in hoch motivierten Teams.



jobs@initag.de | 0721.6100.0 | www.init-ka.de  
init AG | Kappelstr. 4-10 | 76131 Karlsruhe

#### Abstract

Mobile applications facilitate new services that enable individual mobility. Public transport in particular benefits from this development, since passengers rely heavily on real-time and location-based information via mobile apps. This article presents two research projects on different aspects of adaptive mobility services via mobile apps. The project "DYNAMO" focused on the development of usable interaction concepts and easy integration of social media in public transport apps. Furthermore, the project "DynAPSys" developed a companion system that individualizes mobility for users based on their personal schedules.

#### Zusammenfassung

Mobile Applikationen bringen Dienste hervor, die eine individuelle Mobilität ermöglichen. Der öffentliche Verkehr (ÖV) kann hiervon besonders profitieren, da Fahrgäste im ÖV auf Echtzeit- und ortsbezogene Informationen angewiesen sind. In diesem Artikel werden zwei Forschungsprojekte zu verschiedenen Aspekten solcher Mobilitätservices vorgestellt. Im Projekt „DYNAMO“ wurden

Bedienkonzepte für mobile ÖV-Apps, sowie eine Plattform zur Integration von Social Media entwickelt. Im Projekt „DynAPSys“ wurde ein Agenda-Planungssystem umgesetzt, das individuelle Mobilität auf Basis des eigenen Kalenders ermöglicht.

#### Autoren

**Dr. Regina Schindwein**

**Dipl.-Inf. Christine Keller**

Akademische Mitarbeiterinnen am Institut für Ubiquitäre Mobilitätssysteme der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegel**

Professor an der Fakultät für Informationsmanagement und Medien der Hochschule Karlsruhe und Leiter des Instituts für Ubiquitäre Mobilitätssysteme

#### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlegel

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Informationsmanagement und Medien

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [thomas.schlegel@hs-karlsruhe.de](mailto:thomas.schlegel@hs-karlsruhe.de)



## Entwickle Software für die Besten!\*

Wir freuen uns über Deine Bewerbung, u.a. als

**Softwareentwickler** (m/w) für iOS, Android, Java oder C++

**Projektmanager** (m/w)

**Studentische Hilfskraft** (m/w)

\*HaCon wurde vom MIT als eine der „50 Smartest Companies“ weltweit ausgezeichnet.

E-Mail: [jobs@hacon.de](mailto:jobs@hacon.de)

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

 **HaCon**  
Traffic • Software • Service



# Software und Methoden zur optimierungsbasierten Regelung nachhaltiger Energiesysteme

Adrian Bürger, Angelika Altmann-Dieses, Moritz Diehl und Marco Braun

Die Möglichkeit der mathematischen Modellierung eines technischen Systems eröffnet verschiedene Optimierungspotenziale. So kann zum einen die Planung und Auslegung eines Systems optimiert werden, wenn mit Hilfe geeigneter Simulationen im Vorfeld ermittelt werden kann, welche Komponenten für den Einsatz innerhalb des zu planenden Systems am besten geeignet sind und wie diese optimal dimensioniert werden können.

Darüber hinaus kann auf Basis geeigneter Systemmodelle auch der laufende Betrieb eines bestehenden Systems optimiert werden, indem optimierte Steuersignale zur Erreichung definierter Zielgrößen (z. B. Zieltemperaturen innerhalb eines chemischen Reaktors, vorgegebene Geschwindigkeiten oder Positionen von Fahrzeugen etc.) ermittelt werden, mit denen diese Zielgrößen optimal (z. B. möglichst schnell oder möglichst günstig) erreicht werden können.

Im Folgenden wird die Laboranlage für solare Klimatisierung der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe vorgestellt, wo aktuell der Einsatz von optimierungsbasierten Regelungsverfahren für eine kombinierte Anwendung aus den Bereichen Gebäudeklimatisierung und regenerativer Energieerzeugung untersucht wird.

## Modellprädiktive Regelung

Werden Steuersignale im Vorfeld des Betriebs durch die Lösung eines Optimierungsproblems errechnet und anschließend auf das System angewendet, so spricht man von optimaler Steuerung. Mit dieser Methodik können optimierte Vorgehensweisen zur Erreichung und/oder Einhaltung vorab definierter Zielgrößen ermittelt werden. Kommt es jedoch im laufenden Betrieb zu Störungen oder weicht das verwendete Systemmodell zu stark vom Realsystem ab, so werden die Ziele eventuell nicht erreicht, da es keine Möglichkeit gibt, auf die Diskrepanz zwischen prognostiziertem und realem Systemverhalten zu reagieren.

Dieser Problematik kann begegnet werden, indem das Optimalsteuerungsproblem im laufenden Betrieb regelmäßig neu gelöst wird. Der momentane Zustand des Systems dient dabei jeweils als Ausgangszustand. Auf das System angewendet werden dann immer nur

die kurzfristigen Steuerungssignale, die für die nähere Zukunft als optimal ermittelt wurden. Die langfristigen Steuersignale werden hingegen nicht auf das System angewandt, sondern dienen als Prognose wie und ob die angestrebten Ziele unter den definierten Operationsbereichen eines Systems überhaupt erreicht werden können. Diese Form der Regelung wird als modellprädiktive Regelung bezeichnet.

Im Vergleich zu konventionellen Reglern, die maßgeblich den aktuellen Zustand eines System betrachten und damit nur eingeschränkt vorausschauend handlungsfähig sind, können durch den Einsatz dieser optimierungsbasierten Regelungsverfahren rapidere Regelentscheidungen getroffen werden, da durch die modellbasierte Prognose des Systemverhaltens die Gefahr des Über- oder Unterschwingens verringert wird. Zudem ist es hierdurch möglich, auch zukünftige Umgebungseinflüsse für langfristige Regelentscheidungen aktiv miteinzubeziehen.

## Potenziale modellprädiktiver Regelung für regenerative Energie- und Klimasysteme

Insbesondere bei regenerativen Energiesystemen, bei denen die Verfügbarkeiten der antreibenden Energiequellen (z. B. Sonne oder Wind) teilweise stark von nicht beeinflussbaren Faktoren abhängen, ist es von großem Vorteil, wenn die zukünftige Reaktion eines Systems auf eine prognostiziert verfügbare Energiemenge vorausbestimmt werden kann. So können dann Versorgungsengpässe gezielt abgewendet und/oder umgangen werden und ineffiziente Betriebsmodi eines Systems oder auch einzelner Komponenten gezielt vermieden werden.

Auch im Bereich der Gebäudeklimatisierung ist der Einsatz von modellprädiktiven Regelungsverfahren häufig mit großen Effizienzsteigerungen verbunden. Grund ist die hohe Trägheit der Systeme, die u. a. von hohem thermischen Speichervermögen der Baustoffen bestimmt wird. So dauert es z. B. einige Zeit, bis sich ein Einschalten der Raumklimatisierung auf die tatsächliche Temperatur im Raum auswirkt. Dieses verzögerte Verhalten ist für konventionelle Regelungsverfahren aufgrund der eingeschränkten Zukunftsorientierung oft problematisch. Sind diese Verhaltensweisen jedoch modellhaft bekannt, kön-

nen sie langfristig in Regelentscheidungen miteinbezogen werden.

### Das Labor für solare Klimatisierung der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Im Oktober 2016 wurde an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften die Laboranlage für solare Klimatisierung in Betrieb genommen. Die Kernkomponente des Systems bildet eine Adsorptionskältemaschine, die zur Kälteerzeugung mit solarthermisch gewonnener Wärme versorgt wird. Die produzierte Kälteleistung wird zur Kühlung des Atriums des Fakultätsgebäudes eingesetzt, welches ganzjährig von Studierenden als Lern- und Arbeitsraum, sowie als Veranstaltungsraum genutzt wird, und sich bislang während des Sommers stark aufheizte.



Abb. 1: Laboranlage mit Adsorptionskältemaschine, thermischen Speichern und Arbeitsplätzen (Foto: Adrian Bürger)

Im Winter nutzt die Fakultät die solare Wärme direkt zur Heizungsunterstützung. In beiden Fällen wird der Wärmeaustausch mit der Raumluft über vier Gebläsekonvektoren im Atrium erreicht. Durch den Einsatz unterschiedlicher Kollektortypen (Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren) ist ein Betrieb des Systems auch bei verschiedenen Sonneneinstrahlungsverhältnissen möglich. Versorgungsengpässe im System können durch den Einsatz von Wärme- und Kältespeichern kurzzeitig überbrückt werden.



Abb. 2: Flachkollektorfeld auf dem Dach des Gebäudes K

(Foto: Adrian Bürger)

### Erforschung optimierungsbasierter Regelungsverfahren

Als maßgeblich regenerativ angetriebenes Klimatisierungssystem eignet sich das System zur Untersuchung optimierungsbasierter Regelungsverfahren sowohl für den Klimatisierungsbereich als auch für den Bereich erneuerbarer Energien.

Die Konzeption und Implementierung von optimierungsbasierten Regelungsverfahren für dieses System ist Ziel des Projekts Software und Methoden zur Systemidentifikation und optimierungsbasierten Regelung nachhaltiger Energiesysteme (OPT-NES) der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe und der Professur für Systemtheorie, Regelungstechnik und Optimierung am Institut für Mikrosystemtechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Das Projekt wird maßgeblich im Rahmen einer Promotion bearbeitet.

Die im Projekt erstellten Softwarepakete enthalten neben Algorithmen und Methoden zur modellprädiktiven Regelung auch Methoden, die die Identifikation der für die Regelung benötigten Modelle unterstützen, z. B. Methoden zur Schätzung unbekannter Systemparameter auf Basis von Messdaten. Zudem werden Methoden zum optimierten Design von Experimenten enthalten sein, die es ermöglichen, Experimente so zu planen, dass größtmögliche Information über die zu identifizierenden Systemeigenschaften erhalten werden können.

Getestet am solaren Klimatisierungssystem wird die im Projekt erstellte Software als Open-Source-Anwendung bereits schrittweise während der Entwicklung der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. So können die Methoden auch auf andere Systeme und Themenbereiche aus Industrie und Forschung angewendet werden. Gefördert wird das Projekt im Rahmen der „Forschungs-

allianz Oberrhein zu den technischen Grundlagen der Nachhaltigkeit“ des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg.

Der Betrieb des Systems, sowie Tests der Software und Modellbildung werden unterstützt durch eine Vielzahl von Bachelor- und Masterthesen unterschiedlicher Ausrichtungen, in denen Studierende aktiv mit und an dem System arbeiten.

#### Fachgruppenübergreifende Kooperationen und Einsatz als Lehrlabor

Durch eine geeignete Einbindung der Anlage ins Hochschulnetz sowie einer koordinierten Verteilungsform für Mess- und Anlagendaten, können Maschinendaten zudem auch anderen Arbeitsgruppen automatisiert zur Verfügung gestellt werden, wodurch fachgruppenübergreifende Kooperationen realisiert werden können. So wird z. B. zusätzlich am System aktuell untersucht, wie sich Big-Data Techniken wie Streaming Analytics einsetzen lassen, um ungeeignete Betriebsmodi des Systems automatisiert zu detektieren, und wie mit Predictive Maintenance Methoden eventuelle Ausfälle von Komponenten vorhergesagt und gezielt vermieden werden können.

Zusätzlich zum Einsatz in der Forschung wird das System auch im Rahmen thematisch verwandter Lehrveranstaltungen, für Gruppenprojekte in den Bereichen Modellbildung und -identifikation, Simulation sowie konventionelle und optimierungsbasierte Regelung eingebunden.



# TEAMS WORK.

**Weil Erfolg nur im Miteinander entstehen kann.** Für jede Aufgabe die beste Lösung finden – dieses Credo ließ die Ed. Züblin AG zur Nummer 1 im deutschen Hoch- und Ingenieurbau aufsteigen. Möglich wird dies durch das Know-how und das Engagement unserer rund 14.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die als ein Team komplexe Bauvorhaben termin- und qualitätsgerecht realisieren. Ergreifen Sie die Initiative und steigen Sie bei uns ein, über unser Traineeprogramm, eine Ausbildung, ein Duales Studium, ein Praktikum oder direkt im gewünschten Job. Werden Sie Teil unseres Teams. Wenn wir gemeinsam an einem Strang ziehen, dann sind die Möglichkeiten grenzenlos – auch hinsichtlich Ihres persönlichen Karrierewegs.

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



TEAMS WORK.

Ed. Züblin AG, Human Resource Development, Albstadtweg 3  
70567 Stuttgart/Deutschland, Regionaler Standort: **Direktion Karlsruhe**



ÖKOLÜFTER

#### Frische Nase und warme Füße

Der Ökolüfter ermöglicht eine Wärmerückgewinnung von 90%. Er läuft leise und schützt vor lästigem Lärm und Pollen in Ihren Räumen. Bei gleichzeitiger Feuchterückgewinnung erhalten Sie frische Luft und warme Füße - so schonen wir die Umwelt.

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



#### Abstract

Optimization based control methods offer significant optimization potential for the operation of HVAC systems as well as the operation of plants for renewable energy generation. The solar air conditioning laboratory of the Faculty of Management Science and Engineering, which was taken into operation in October 2016, facilitates research of such methods on a combined application from both fields. The development of related methods and software is the scope of the OPT-NES project.

#### Zusammenfassung

Optimierungsbasierte Regelungsverfahren bieten große Optimierungspotenziale sowohl für den Betrieb von Klimatisierungssystemen als auch für den Betrieb von Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung. Das im Oktober 2016 in Betrieb genommene solare Klimatisierungssystem der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften ermöglicht die Untersuchung dieser Verfahren an einer kombinierten Anwendung aus beiden Themenfeldern. Die Entwicklung von Methoden und Software hierzu erfolgt im Rahmen des OPT-NES Projekts.

#### Autoren

**Adrian Bürger, M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr. Angelika Altmann-Dieses**

Professorin an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr. Moritz Diehl**

Professur für Systemtheorie, Regelungstechnik und Optimierung am Institut für Mikrosystemtechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

**Prof. Dr.-Ing. Marco Braun**

Professor an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe

#### Kontakt

Adrian Bürger

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

Email: [adrian.buerger@hs-karlsruhe.de](mailto:adrian.buerger@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-1956



**HEBERGER**

- Schlüsselfertiger Industriebau
- Parkhausbau
- Betonfertigteilverk

HEBERGER System-Bau GmbH · Altretweg 15 · 68809 Neulussheim  
Tel. 06205-399-0 · Fax 06205-399-200 · [www.heberger.de](http://www.heberger.de)

# OptiSorp: Steigerung der Leistungsdichte von Adsorber Compounds für mobile und stationäre Adsorptionswärmepumpen

Oliver Kraft und Matthias Stripf

## Einführung und Zielsetzung

Die Bereitstellung einer langfristig sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung erfordert die Entwicklung neuer effizienter und umweltfreundlicher Energiewandlungstechnologien. Sorptionsprozesse bieten hier eine Möglichkeit zur technischen Realisierung von thermisch angetriebenen Wärmetransformationsanwendungen, die nicht nur den Wärme- sondern auch den Exergieinhalt von Wärmeströmen nutzen. Dadurch kann Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres gepumpt werden, was neue Möglichkeiten zur Kälte- und Wärmeerzeugung in mobilen und stationären Anwendungen eröffnet. Grundlegende Voraussetzung ist allerdings eine deutliche Steigerung der heute erreichten Leistungsdichte, um die Kosten der Anlagen soweit zu senken, dass auch ohne staatliche Förderung die Konkurrenzfähigkeit zu herkömmlicher Technik gegeben ist.

Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhabens OptiSorp (Förderkennzeichen 03FH023PX4) ist deshalb die Entwicklung thermisch aktiver Strukturen der zweiten Generation und deren Applikation in Sorptionsmodulen höherer Leistungsdichte. Der Fokus liegt dabei auf der Optimierung des verwendeten Sorptionsmaterials Aktivkohle hinsichtlich dessen Beladungsbreite (also der Differenz zwischen Maximal- und Minimalbeladung) mit Methanol bei größeren Temperaturhuben und der Steigerung der Kinetik der sich überlagernden Wärme- und Stofftransportprozesse.

Im Rahmen dieses Projekts soll die Sorptionskinetik durch Einsatz gerichteter, mehrskaliger Strukturen signifikant gesteigert und in Sorptionsmodulen eines optimierten Designs eingebracht werden. Die gesteigerte Kinetik kann zur Verkürzung der Desorptions- und Adsorptionszeiten und damit zu einer Erhöhung der Leistungsdichte genutzt werden, wodurch sich der Materialeinsatz und die Baugröße reduzieren. Zur zielgerichteten Optimierung der Strukturen werden außerdem Berechnungsmodelle für den Stoff- und Wärmetransport mit Adsorption in porösen Materialien mit gerichteten Strukturen entwickelt.

Abbildung 1 stellt einen Aktivkohleadsorber mit gerichteten und durchgängigen Stofftransportporen dar.

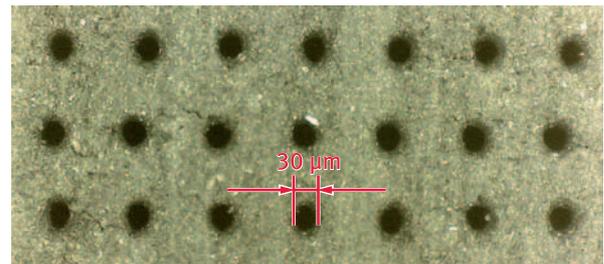


Abb. 1: Aktivkohleadsorber mit Stofftransportporen (Foto: Oliver Kraft)

Für eine gezielte Verbesserung der Leistungsdichte einer Adsorptionswärmepumpe werden alle Stoff- und Wärmetransportparameter durch Experimente ermittelt und mithilfe von entwickelten Berechnungsmodellen ausgewertet und quantifiziert.

## Numerische Voruntersuchungen zur Verbesserung der Stoff- und Wärmetransporteigenschaften

Zur Verbesserung des Stoff- und Wärmetransports bzw. zur Steigerung der volumetrischen Leistungsdichte sollen die Formkörper zum einen mit Fasern versetzt werden, die beim Sinterprozess verdampfen und gerichtete Transportporen hinterlassen. Zum anderen werden die Aktivkohlekörper mit Zusatzstoffen hoher Wärmeleitfähigkeit versetzt, um den Wärmetransport zu verbessern. Da durch diese Maßnahmen zwar die Transporteigenschaften verbessert werden, jedoch auch Aktivkohlemasse verdrängt wird und sich somit die Beladungskapazität pro Volumeneinheit verringert, werden numerische Voruntersuchungen durchgeführt, mit denen die optimalen Mengen an Additiven bestimmt werden. Hierzu dient ein Finite Elemente (FE)-Simulationsmodell einer Wärmepumpe. Zur Bewertung dienen die Koeffizienten COP (Coefficient of Performance) und VCP (Volumetric Cooling Power = Leistungsdichte). Der COP beschreibt den Quotienten der genutzten zur aufgewendeten Wärmemenge, wohingegen die Leistungsdichte VCP die Anlagengröße der Wärmepumpe und die Zykluszeit berücksichtigt. Abbildung 2 zeigt die Auswirkungen einer Schichtdickenvariation der Aktivkohleformkörper auf COP und VCP mit und ohne makroskopische Transportstrukturen.

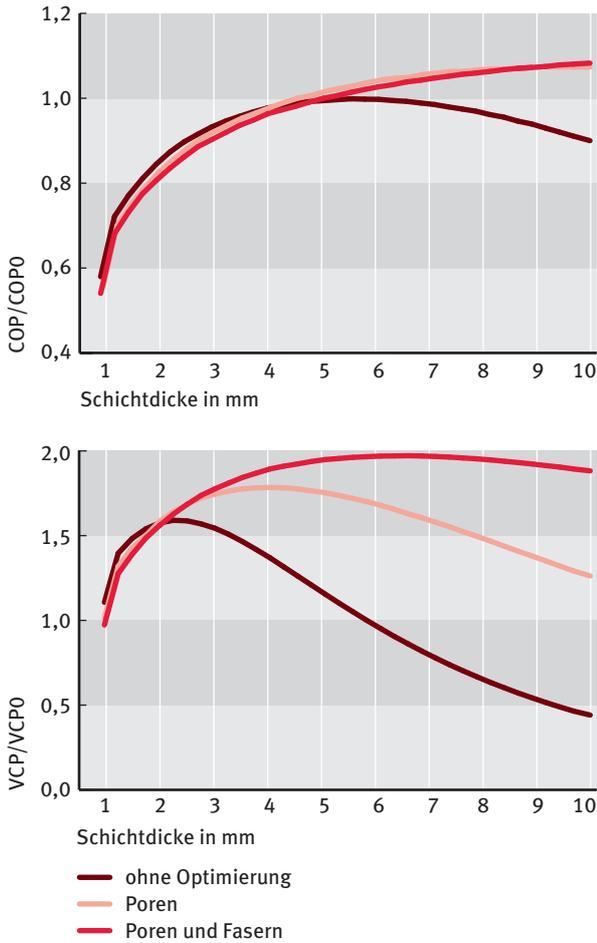


Abb. 2: Leistungszahl und Leistungsdichte in Abhängigkeit der Formkörperdicke

Die Verbesserungen des Stoff- und Wärmetransports bewirken bei höheren Schichtdicken eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte VCP. Die Leistungszahl COP kann dabei sogar ebenfalls etwas gesteigert werden. Dies bedeutet in der praktischen Anwendung eine höhere Leistungszahl bei gleichzeitig kleinerer Anlagengröße und geringeren Kosten.

**Experimentelle Untersuchung**

Zur Untersuchung und vollständigen Charakterisierung der am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik hergestellten optimierten Aktivkohleformkörper müssen die Beladungskurve, die thermischen Eigenschaften und die Adsorptionskinetik in Abhängigkeit der Beladung ermittelt werden. Die hierfür notwendigen Messverfahren wurden im Rahmen des Projekts entwickelt.

Bestimmung der Gleichgewichts- und Kinetikeigenschaften

Die Bestimmung der Beladungskurve eines Aktivkohle-Methanol-Paares erfolgt mit Hilfe der Drucksprungmethode. In Abbildung 3 ist die zugehörige Versuchsanlage dargestellt.

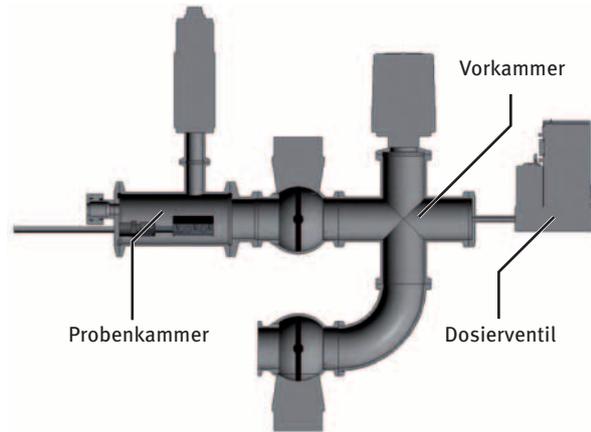


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Das Adsorbens wird zunächst auf 140°C temperiert und die Vakuummkammern evakuiert. Darauf folgt ein vorgegebener Druck in der Vorkammer, das Ventil zur Probenkammer geöffnet bis isobare Gleichgewichtsbedingungen vorliegen. Mit Hilfe der bekannten Volumina und den temperatur- und druckabhängigen Gasdichten wird durch eine Massenbilanz die Beladungsänderung bestimmt. Für die Auswertung der Kinetikeigenschaften wird ein FE-Modell verwendet, welches die Beladungskurve und beladungsabhängigen Stoffgrößen berücksichtigt. Das verwendete Modell variiert mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus die Stofftransportparameter, bis die simulierte Druckverlauf mit dem gemessenen übereinstimmt. Beispielhaft ist ein solcher Druckverlauf in Abbildung 4 dargestellt.

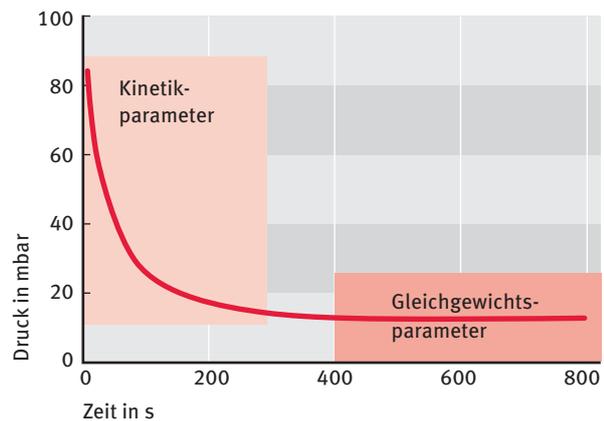


Abb. 4: Drucksprungsignal

Dieser Ablauf wird wiederholt bis die Maximalbeladung der Probe erreicht ist. Um Hysterese-Effekte in der Beladungskurve detektieren zu können wird diese auch bei der Desorption gemessen, d.h. die Vorkammer wird evakuiert, sodass negative Drucksprünge resultieren. Die Charakterisierung der Be- und Entladungskurve wird vollautomatisch durchgeführt.

Aktivkohlen unterscheiden sich in ihrer Beladungskapazität aufgrund der inneren Mikroporenstruktur bzw. BET-Oberfläche. Diese kann durch die Aktivierungsart (chemisch oder wasserdampfaktiviert), die Aktivierungstemperatur sowie die Aktivierungsdauer beeinflusst werden. Für die Entwicklung einer Aktivkohle mit hoher Beladungskapazität für Methanol wurden aus demselben Basismaterial, durch unterschiedliche Aktivierungszeiten, verschiedene Aktivkohlen realisiert und auf ihre Beladungseigenschaften untersucht. Zur Beschreibung der inneren Mikrostruktur hat sich die BET-Oberfläche als geeignet erwiesen. Von der Probe A bis zur Probe F nimmt die Aktivierungszeit zu. Abbildung 5 zeigt die BET-Oberflächen und den Beladungshub im Arbeitsbereich einer Wärmepumpe der untersuchten Aktivkohlen.

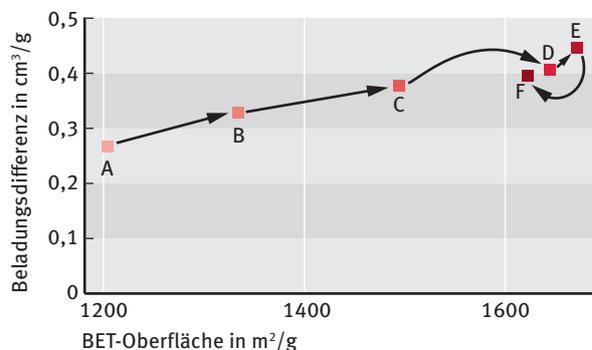


Abb. 5: Beladungskurven von Aktivkohlen mit in Pfeilrichtung steigender Aktivierungsdauer

Zunächst nimmt sowohl die BET-Oberfläche als auch der Beladungshub zu, da bei steigender Aktivierungszeit mehr Mikroporen gebildet und somit mehr Adsorptionsplätze für Methanolmoleküle geschaffen werden. Von Probe E zu Probe F sinken beide Parameter jedoch, da bei einer zeitlich zu langen Aktivierung die Mikroporen zusammenwachsen, sodass die BET-Oberfläche wieder abnimmt. Des Weiteren sind die Poren in ihren Durchmessern angewachsen, sodass die Bindungskräfte zu den Methanolmolekülen stark abnehmen. Durch diesen Effekt stehen diese Poren für den Adsorptionsprozess nicht mehr zu Verfügung. Der Beladungshub der Aktivkohle konnte im Rahmen des Projekts um 50 % gesteigert werden.

#### Bestimmung der beladungsabhängigen Wärmeleitfähigkeit/ Wärmekapazität

Die Transient-Hot-Bridge-Methode (THB) ist ein neues Messverfahren für die experimentelle Bestimmung der thermischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit. Bei dieser Methode handelt es sich um ein instationäres Messverfahren, bei dem, im Vergleich zu den stationären Messverfahren,



## Technik, einfach erklärt!

Was ist ein h,x-Diagramm?  
 Wie funktioniert eine adiabatische Kühlung?  
 Was ist ein Hybrid-Luftbefeuchter?

Präzise, fachlich fundierte Antworten  
 in verständlichen 3-Minuten-Clips  
 finden Sie auf dem  
 Condair-Youtube-Channel oder  
 unter: [www.condair.de/fachwissen](http://www.condair.de/fachwissen)



Der Condair-Youtube-Channel  
 Technik einfach erklärt!

Luftbefeuchtung  
 und Verdunstungskühlung



viel kürzere Messzeiten benötigt werden: Der THB-Sensor wird zwischen zwei Proben geklemmt und insgesamt acht Heizstreifen induzieren eine Temperaturwelle, welche sich, abhängig von den Wärmetransportgrößen, charakteristisch in der Probe ausbreitet. Die Heizstreifen erwärmen sich während der Messung und durch die Wheatstonesche Verschaltung kommt es zu einer zeitlich abhängigen Brückenverstimmung. In Abbildung 6 ist dieser Sensor sowohl schematisch als auch real dargestellt.

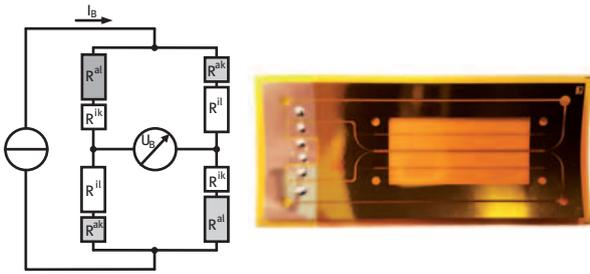


Abb. 6: Transient-Hot-Bridge-Sensor

Für die Bestimmung der beladungsabhängigen thermischen Eigenschaften ist der Sensor an einer Vakuumflanschdurchführung angebracht, um die Messapparatur in Methanoldampfatmosferae betreiben zu können. Hierbei werden unterschiedliche Beladungszustände der Aktivkohle gezielt eingestellt. Die Auswertung erfolgt mithilfe eines FE-Modells, um die Wärme- und Stofftransportmechanismen zusammen mit der Adsorption während der Messung berücksichtigen zu können.

Nach Durchführung und Auswertung mehrerer Messungen bei gezielt eingestellten Methanol-Beladungszuständen ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Beladung (s. Abb. 7). Hierbei handelt es sich um einen Aktivkohleformkörper ohne gerichtete mehrskalige Strukturen.

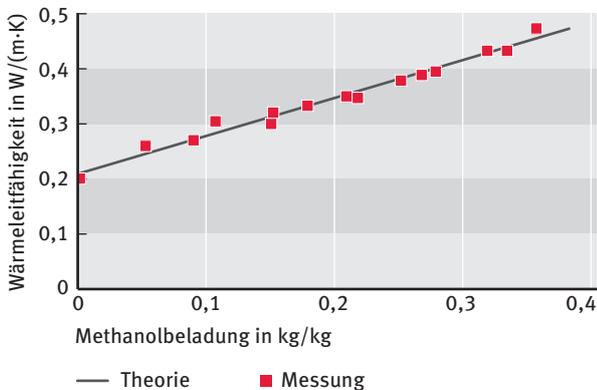


Abb. 7: beladungsabhängige Wärmeleitfähigkeit eines Aktivkohleformkörpers bei 30°C

## Ausblick:

Eine Steigerung des Beladungshubs um 50 % wurde realisiert und experimentell nachgewiesen. Aus den numerischen Voruntersuchungen für das Optimum der Leistungsdichte ergibt sich ein optimaler Porenanteil (Stofftransport) von 1,5 % vol und ein Wärmeleitfaseranteil von 5 % vol. Mit diesen Parametern ist eine Verdoppelung der Leistungsdichte bei Schichtdicken von ca. 7 mm möglich.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Messverfahren konnten mit Hilfe von Referenzproben erfolgreich validiert werden. In den nächsten Schritten werden nun unterschiedliche Variationen der Additivanteile experimentell untersucht und mit den Berechnungsmodellen verglichen

Die optimierten Formkörper werden schließlich noch in einer Pilotanwendung eingesetzt und im Feldversuch getestet.

## Literatur

- [1] U. Hammerschmidt, V. Meier, *New Transient Hot-Bridge Sensor to Measure Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Volumetric Specific Heat*, International Journal of Thermophysics 27.3, 2006 S. 840–865.
- [2] L. Schnabel, *Experimentelle und numerische Untersuchung der Adsorptionskinetik von Wasser an Adsorbens-Metallverbundstrukturen*, Technische Universität Berlin, 2009.
- [3] W. Kast, *Adsorption aus der Gasphase, Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren*, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, Basel, New York, 1988.
- [4] J. A. Nelder, R. Mead, *A Simplex Method for Function Minimization*, The Computer Journal 7, 1965, S. 308–313.



# Wussten Sie, dass wir mit unseren intelligenten Produkten den Maschinen- und Anlagenbau digitalisieren?

[www.voith.com/karriere](http://www.voith.com/karriere)



Welcome  
to the Next  
150 Years

## VOITH

Inspiring Technology  
for Generations

### Abstract

Low power density of adsorption heat pumps is a substantial barrier to market entry and application in mobile systems. The main goal of the project is therefore the development of thermally active second generation structures and their application in sorption modules. This report provides an overview of the measurement methods and the preliminary results that have been achieved so far. The great potential to improve the power density of adsorption heat pumps using the working pair activated carbon and methanol is demonstrated.

### Zusammenfassung

Die geringe Leistungsdichte von Adsorptionswärmepumpen ist eine der größten Markteintrittsbarrieren für die Technologie und deren Anwendung in mobilen Systemen. Ziel des Vorhabens ist deshalb die Entwicklung thermisch aktiver Strukturen zweiter Generation und deren Applikation in Sorptionsmodulen. Dieser Bericht gibt einen Einblick in die Vorgehensweise, die Messmethoden und die vorläufigen Ergebnisse des Projekts. Es wird gezeigt,

dass ein großes Potenzial besteht, die Leistungsdichte einer Adsorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Aktivkohle-Methanol durch die vorgesehenen Entwicklungen deutlich zu verbessern.

### Autoren

**Oliver Kraft M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Matthias Stripf**

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Stripf  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
Institut für Kälte, Klima- und Umwelttechnik (IKKU)  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: [matthias.stripf@hs-karlsruhe.de](mailto:matthias.stripf@hs-karlsruhe.de)  
Telefon: 0721 925-1919

# Einsatz von Kühlschmierstoffen bei der Bearbeitung von Nickelbasis-Superlegierungen mit vollkeramischen Fräswerkzeugen

Jürgen Sauer, Malte Blum und Rüdiger Haas

## Einleitung

Die Leistungsfähigkeit hoch beanspruchter Bauteile wurde durch Weiterentwicklungen in den Materialwissenschaften ermöglicht. Hoch beanspruchte Bauteile werden in Anlagen und Turbinen unter korrosiver und thermischer Umgebung betrieben. Hier kommen Nickelbasislegierungen als sogenannte Superlegierungen zum Einsatz. Bauteile aus diesen Werkstoffen zeichnen sich durch ihre Langzeitfestigkeit bei hohen Temperaturen aus. Die herausragenden mechanischen Eigenschaften der Nickelbasislegierungen stellen hohe Anforderungen an den Prozess der spanenden Bearbeitung. Die Fräsbearbeitung durch vollkeramische Werkzeuge ermöglicht hohe Schnittgeschwindigkeiten und damit einen großen Werkstoffabtrag. Die Verwendung von Kühlschmierstoffen bietet Vorteile, die bisher nicht genutzt werden konnten, da sich der Einsatz nachteilig auf das Werkzeug auswirkte. Am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe wurden in Zusammenarbeit mit der Firma oelheld GmbH und dem Werkzeughersteller KENNAMETAL GmbH & Co. KG Kühlschmierstoffe eingesetzt, die die Bearbeitung von Superlegierungen mit keramischen Schaftfräsern günstig beeinflussen.

## Superlegierungen

Legierungen die oberhalb von 500°C dauerhaft als Werkstoffe für Bauteile eingesetzt werden können und dabei ausreichende mechanische Eigenschaften und Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit aufweisen, bezeichnet man als warmfeste Superlegierungen bzw. „Heat Resistant Super Alloys (HRSA)“. Solche Hochtemperaturwerkstoffe werden in der Energietechnik, der Antriebstechnik, in der chemischen Industrie, in der Hüttentechnik und im Maschinenbau eingesetzt. Aus ihnen werden Dampf- und Gasturbinen, Dampfkessel, Hochtemperaturreaktoren, Wärmetauscher, Rohrleitungen, Öfen, Beleuchtungen, Flugtriebwerke und Motoren hergestellt. Superlegierungen werden eingesetzt bei der Ammoniak-Synthese, der Hochtemperaturpyrolyse, bei der Wasserstofferzeugung und der Synthesegasherstellung durch Sonnenenergie, in Prozessen der Metallurgie und des Glasschmelzens sowie im Hochtemperatur-Werkzeugbau. Hochtemperaturwerkstoffe sind einer Kombination aus thermischen, mechanischen und

korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt, weswegen sie über eine hohe thermische Langzeitgefügestabilität verfügen müssen. Speziell Nickelbasis-Superlegierungen finden exklusive Anwendung beim Bau von Flugzeugturbinen und Kraftwerk-Gasturbinen. Ziel ist es, die Wirkungsgrade thermischer Maschinen durch Erhöhung der Verbrennungs- und Materialtemperaturen zu steigern. Nickelbasis-Superlegierungen verfügen über die günstigste Kombination aus mechanischen Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und Verarbeitbarkeit. Keine anderen Legierungen ermöglichen im Hochtemperaturbereich eine so hohe Festigkeitssteigerung.[1] Aufgrund ihrer hohen Warmfestigkeit und Härte sind Nickelbasis-Superlegierungen schwer zu zerspanen und gelten als eine für die Bearbeitung anspruchsvollsten Werkstoffgruppen. Für die Bearbeitung am IMP wurde die ausgehärtete, hoch korrosionsbeständige Nickelbasis-Superlegierung Inconel® Alloy 718 (EN Werkstoffbezeichnung NiCr19NbMo, Werkstoff-Nr. 2.4668) gewählt, da dieser Werkstoff am häufigsten in Triebwerken und Turbinen eingesetzt wird. Bei der spanenden Bearbeitung durch Fräsen stellen Turbinenschaufeln, Blisks, Impeller und Triebwerksgehäuse den größten Anteil. Für die Bearbeitung von Inconel® Alloy 718 werden unterschiedliche Angaben gemacht. Am IMP wurde deren Bearbeitung mit vollkeramischen Schaftfräsern untersucht.

## Keramische Fräswerkzeuge

Während Werkzeugsysteme mit Wendeschneidplatten in vielfältiger Form auf dem Markt verfügbar sind und in der Industrie eingesetzt werden, können diese Potenziale bisher nicht auf Fräswerkzeuge unter 16 mm Werkzeugdurchmesser aufgrund von gestalterischen und technologischen Beschränkungen übertragen werden. Für die spezifischen und teils filigranen Konturen von Turbinen und Triebwerksteilen sind Werkzeuge in diesem Durchmesserbereich jedoch unabdingbar und Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl und Hartmetall gelten bisher als alternativlos.[3, 1]

Aufgrund der mechanischen Eigenschaften und der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von Inconel® Alloy 718 werden die Schnittparameter für Hartmetall-Schneidstoffe mit  $v_c = 30 \dots 50$  m/min angegeben. Entwicklungspotenzial bieten nun die seit erst kurzer Zeit verfügbaren



Dieffenbacher ist eine internationale Unternehmensgruppe im Bereich Maschinen- und Anlagenbau. Mit über 1.700 Mitarbeitern und 16 Produktions- sowie Vertriebsstandorten weltweit sind wir ein führender Hersteller von Pressensystemen und kompletten Produktionsanlagen für die Holz- und Automobilindustrie.

Sie möchten mit uns neue Technologien entwickeln, Visionen verwirklichen und unsere Kunden begeistern?

Wir suchen Studenten und Absolventen folgender Fachbereiche:

- Elektrotechnik
- Maschinenbau
- Wirtschaftsingenieurwesen
- Mechatronik
- (Wirtschafts-)Informatik
- Verfahrenstechnik

Werden Sie Teil eines erfolgreichen, familiengeführten Global Players und gestalten Sie mit uns die Lösungen von morgen!

Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!

**DIEFFENBACHER**

DIEFFENBACHER GMBH Maschinen- und Anlagenbau  
Heilbronner Straße 20 | 75031 Eppingen | Tel.: +49 (0)7262 65 281  
studium@dieffenbacher.de | www.ich-will-zu-dieffenbacher.de

**PEPS V8**  
CAD/CAM SYSTEM

**NEU: PEPS Version 8.1**

70% kürzere Rechenzeiten im 3D Fräsen

30% weniger Materialbedarf durch High Quality Nesting

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

## Messen und Ausstellungen 2017-2018



### 2017

**5. Faszination Modellbahn**  
Internationale Messe für Modell-eisenbahnen, Specials & Zubehör  
**10.-12.03.2017**  
Messe Sinsheim

**Fakuma 25. Fakuma**  
Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung  
**17.-21.10.2017**  
Messe Friedrichshafen

**5. Faszination Modeltech**  
Internationale Messe für Flugmodelle, Cars & Trucks  
**24.-26.03.2017**  
Messe Sinsheim

**Faszination Modellbau 16. Faszination Modellbau FRIEDRICHSHAFEN**  
Int. Messe für Modellbahnen und Modellbau **03.-05.11.2017**  
Messe Friedrichshafen

**Control 31. Control**  
Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung  
**09.-12.05.2017**  
Messe Stuttgart

**Echtdampf Hallentreffen 22. Echtdampf Hallentreffen**  
Dampfbetriebene Modelle von Eisenbahnen, Straßenfahrzeugen, Schiffen und stationären Anlagen  
**03.-05.11.2017** Messe Friedrichshafen

**Control 3. Control India**  
Fachmesse für Qualitätssicherung  
**08.-10.06.2017**  
Bombay Exhibition & Convention Centre, Mumbai

**Blechexpo 13. Blechexpo**  
Internationale Fachmesse für Blechbearbeitung  
**07.-10.11.2017**  
Messe Stuttgart

**Motek 3. Motek India**  
Fachmesse für Produktions- und Montageautomatisierung  
**08.-10.06.2017** Bombay Exhibition & Convention Centre, Mumbai

**Schweisstec 6. Schweisstec**  
Internationale Fachmesse für Fügetechnologie  
**07.-10.11.2017**  
Messe Stuttgart

### 2018

**Control 7. Control China**  
Fachmesse für Qualitätssicherung  
**August 2017**  
SINEC W5 Hall, Shanghai, China

**Control 32. Control**  
Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung  
**24.-27.04.2018**  
Messe Stuttgart

**Motek 36. Motek**  
Internationale Fachmesse für Produktions- und Montageautomatisierung  
**09.-12.10.2017** Messe Stuttgart

**Optatec 14. Optatec**  
Internationale Fachmesse für optische Technologien, Komponenten und Systeme  
**15.-17.05.2018** Frankfurt / M.

**Bondexpo 11. Bondexpo**  
Internationale Fachmesse für Klebtechnologie  
**09.-12.10.2017**  
Messe Stuttgart

**Stanztec 6. Stanztec**  
Fachmesse für Stanztechnik  
**19.-21.06.2018**  
CongressCentrum Pforzheim

**Druck+Form 23. Druck+Form**  
Fachmesse für die druckende Industrie  
**11.-14.10.2017**  
Messe Sinsheim

**Fakuma 26. Fakuma**  
Internationale Fachmesse für Kunststoffverarbeitung  
**16.-20.10.2018**  
Messe Friedrichshafen

**P. E. Schall GmbH & Co. KG**  
Gustav-Werner-Straße 6 • D-72636 Frickenhausen  
T +49 (0)7025 9206-0 • F +49 (0)7025 9206-880  
info@schall-messen.de • www.schall-messen.de

**Messe Sinsheim GmbH**  
Neulandstraße 27 • D-74889 Sinsheim  
T +49 (0)7261 689-0 • F +49 (0)7261 689-220  
info@messe-sinsheim.de • www.messe-sinsheim.de

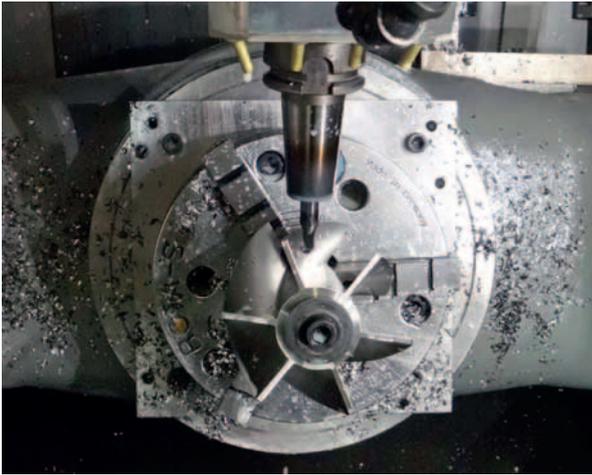


Abb. 1: Bearbeitung eines Impellers (Foto: Malte Blum)

einteiligen keramischen Schaftfräswerkzeuge. Die Trockenbearbeitung wird für diese Werkzeuge aufgrund der hohen Temperaturfestigkeit der Keramik mit Schnittgeschwindigkeiten von über  $v_c = 1\ 000\ \text{m/min}$  angegeben.

Schneidkeramiken sind Schneidstoffe aus Aluminiumoxid oder Siliciumnitrid als Basis. Mischkeramiksarten enthalten neben einem Aluminiumoxidanteil von weniger als 90 % einen großen Anteil an Metallcarbiden. Aluminiumoxid als Härte Träger verleiht dem Schneidstoff eine hohe Warmhärte und in Verbindung mit der geringen Diffusionsneigung und seiner Oxidationsbeständigkeit gute Verschleißigenschaften. Titancarbid- und Titanitridanteile erhöhen die Härte und die Verschleißfestigkeit und ermöglichen das Zerspanen von Stählen mit Härten bis zu 64 HRC.[2] Durch Zirconiumoxidanteile können die Festigkeitseigenschaften verbessert werden. Schneidkeramik auf der Basis von Siliciumnitrid wird besonders in der spanenden Bearbeitung von Grauguss und hochwarmfesten Werkstoffen eingesetzt. Zum Zerspanen von Stählen sind Siliciumnitride nicht geeignet, da sie bei ca.  $1\ 200^\circ\text{C}$  Ferrosilicium bilden. Die Materialklasse der Silicium-Aluminiumoxid-Nitride (SiAlONe) besitzt die gleiche Zähigkeit wie Siliciumnitrid, weist aber eine höhere Härte auf. SiAlONe werden durch Flüssigphasensintern und anschließender Wärmebehandlung hergestellt.[4] Der Elastizitätsmodul von SiAlONen entspricht dem von Siliciumnitrid und liegt bei 320 GPa. Die Bruchzähigkeit liegt zwischen  $4\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  und  $7\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Als problematisch für die spanende Bearbeitung mit einem keramischen Schneidstoff gilt die Empfindlichkeit gegenüber thermischen Wechselbelastungen. In der Literatur findet sich hierzu als Kennwert die Thermoschockzahl. Die Thermoschockzahl für Nitridkeramiken weist im Vergleich zu Oxidkeramiken eine um den Faktor 5 höhere Thermoschockbeständigkeit auf,

weshalb die Anwendung im unterbrochenen Schnitt und die Verwendung von Kühlschmierflüssigkeiten als problemlos möglich bezeichnet wird.[2]

Die vollkeramischen Schaftfräswerkzeuge aus SiAlON werden für die Versuche von der Firma KENNAMETAL GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt. Der Durchmesser der Werkzeuge beträgt  $d = 12\ \text{mm}$ .

### Kühlschmierstoffe

Die Vorteile der Verwendung von Kühlschmierstoffen liegen im Abtransport der Späne und der bei der Bearbeitung entstehenden Wärme. In der konventionellen Bearbeitung wird weiter durch den Einsatz von Kühlschmierstoffen die Standzeit der Werkzeuge und die Oberflächengüte verbessert.

Kühlschmierstoffe stehen in wassermischbarer und nichtwassermischbarer Form zur Verfügung. In Zusammenarbeit mit der Firma oelheld GmbH wird ein Kühlschmierstoff für die Fräsbearbeitung von Inconel® Alloy 718 mit keramischen Schaftfräsern entwickelt. Aufgrund dessen geringerer Wärmekapazität ( $c_{01} = 1\ 675\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) und Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Wasser ( $c_w = 4\ 200\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), aus Sicherheitsgründen und um dem bekannten Problem der Rissbildung am Werkzeug aufgrund thermischer Wechselbelastungen vorzubeugen, wird ein nichtwassermischbarer Kühlschmierstoff verwendet. In Versuchen mussten ein geeignetes Grundgemisch und verschiedene Additive erprobt werden, damit anschließend eine Formulierung für einen Kühlschmierstoff durchgeführt werden konnte. Da hohe Temperaturen Kohlenwasserstoffgemische zersetzen können, ist die Kenntnis der Temperaturen bei der Bearbeitung für die Entwicklung des Kühlschmierstoffs notwendig.

### Fräsbearbeitung

Die Verwendung von Kühlschmierstoffen bei der Schruppbearbeitung von Inconel® Alloy 718 mit keramischem Schaftwerkzeug hat zum Ziel, die genannten Vorteile im Hinblick auf eine Verlängerung des Werkzeug- bzw. Standwegs gegenüber der Trockenbearbeitung zu nutzen. Während bei der Bearbeitung mit Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall der Verschleiß als ein Kriterium eingesetzt und ermittelt werden kann, ist dies für die keramischen Werkzeuge so nicht möglich. In der Praxis werden keramische Schaftfräser bis zum Bruch mehrerer Schneiden bzw. des gesamten Werkzeugs eingesetzt. Um messbare Vergleiche für den Prozess bei der Fräsbearbeitung von Inconel® Alloy 718 zu erhalten, werden die Schnittkräfte und Temperaturen ermittelt. Als Referenz ist die Trockenbearbeitung festgelegt. Die Schnittkräfte werden durch die Auf-

spannung auf einer Kraftmesseinheit gemessen. Für die Temperaturen wird bei der Trockenbearbeitung mit einer Infrarot-Thermokamera die Temperatur am Werkzeug bestimmt. Zusätzlich werden Thermolemente in das Werkstück eingebracht und die Temperatur im Abstand von 0,2 mm unterhalb der Bearbeitungsebene zur Werkzeugstirnfläche auf der Höhe der Seitenschneide gemessen. Das Ende des Standwegs wird für die Versuche entweder durch das Erreichen einer gemessenen kritischen Schnittkraft oder durch den Bruch mehrerer Schneiden festgelegt.

Bei der Bearbeitung sind besondere Schutzvorkehrungen zu treffen. Aufgrund der Schnittparameter fliegen glühende Späne durch den Arbeitsraum der Werkzeugmaschine und es besteht die Gefahr, dass sich der Kühlschmierstoff entzündet. Es muss also ein ausreichend großer Volumenstrom des Kühlschmierstoffs vorhanden sein, um die Entflammbarkeit zu vermeiden.



Abb. 2: Trockenbearbeitung von Inconel<sup>®</sup> Alloy 718 mit keramischem Werkzeug (Foto: Jürgen Sauer)

Für alle Versuche gelten die Werkzeugdaten und Schnittparameter in Abbildung 4. Die Versuche wurden auf einer CNC Fräsmaschine Hermle C40 U der Firma Hermle AG durchgeführt. Abbildung 3 zeigt den Versuchsstand mit Messwagen.

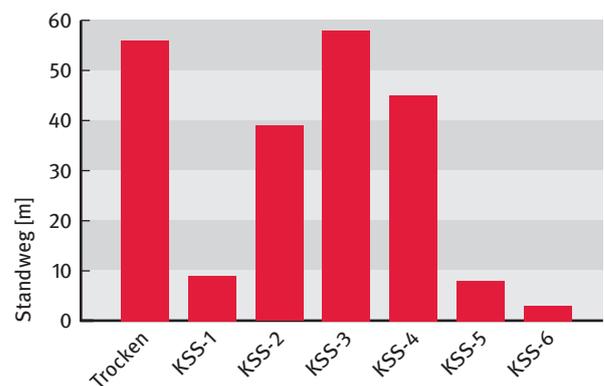
**Ergebnisse**

Die Erkenntnisse aus den ersten Spanversuchen mit verschiedenen Kühlschmierstoffen führten in einer zweiten Versuchsreihe zu weiteren Kühlschmierstoffgemischen. Der Einsatz hatte in einem Fall keine nachteilige Wirkung auf den Standweg. Neben der Bindung der Späne und deren Transport aus dem Bearbeitungsraum wird die durch die Zerspanung entstehende sehr große Wärme abtransportiert. Durch die hohe Schnittgeschwindigkeit besteht eine enorme Temperaturentwicklung, die sonst über die Spindel abgeleitet wird. In allen Versuchen wurden bei der Bearbeitung mit verschiedenen



Abb. 3: Versuchsstand mit Messwagen (Foto: Jürgen Sauer)

Kühlschmierstoffen höhere Schnittkräfte als bei der Trockenbearbeitung gemessen. Trotz erhöhter Schnittkräfte wurde mit dem Kühlschmierstoff KSS-3 der Werkzeug- bzw. Standweg um 4 % gegenüber der Trockenbearbeitung übertroffen.



Werkzeugdaten  
 d = 12 mm  
 z = 6  
 Schneidstoff:  
 SiAlON

Schnittparameter  
 $v_c = 650$  m/min  
 $f_z = 0,03$  mm  
 $a_p = 4$  mm  
 $a_e = 0,6$  mm

Werkstoff 2.4668

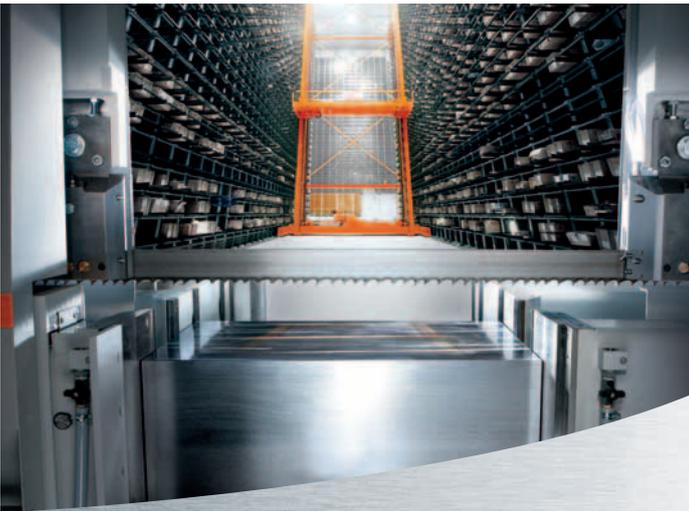
Abb. 4: Standwege im Vergleich zur Trockenbearbeitung

**Ausblick**

In den zurzeit laufenden Versuchen werden die Erkenntnisse der ersten Versuche und die Auswirkungen der neu eingesetzten Kühlschmierstoffe untersucht, sodass mit Hilfe dieser Ergebnisse weitere Schlüsse und Maßnahmen für Formulierungen zu einem neuen Kühlschmierstoff getroffen werden können. In weiteren Versuchen müssen diese neuen Kühlschmierstoffe erprobt werden. Die Ergebnisse der ersten Versuche zeigen, dass eine Leistungssteigerung bei der Bearbeitung von Nickelbasis-Superlegierungen mit keramischen Schaftfräsern und der Verwendung von Kühlschmierstoffen möglich ist, dass sich die Vorteile der Kühlschmierung nutzen lassen und dass dieses Projekt eine Innovation in der Zerspanung erwarten lässt.

## Literatur

- [1] H.-J. Maier, T. Niendorf, R. Bürgel, *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*, 5. Aufl., Wiesbaden, 2015.
- [2] A. H. Fritz, G. Schulze, *Fertigungstechnik*, 10. Aufl., Heidelberg, 2012, p. 280, p. 286
- [3] M. Wacinski, *Keramische Schaftfräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-Legierungen*, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Fraunhofer IPK, Berlin, 2016.
- [4] M. Riva, *Entwicklung und Charakterisierung von Sialon-Keramiken und Sialon-SiC-Verbunden für den Einsatz in tribologisch hochbeanspruchten Gleitsystemen*, Schriftenreihe des Instituts für Keramik im Maschinenbau (IKM), Karlsruher Institut für Technologie, 2010, pp. 10-15



## Sägen. Lager. Mehr.

KASTO bietet mehr als hochproduktive Sägen und Lager für Langgut und Blech: mehr Engagement, mehr Verantwortung, mehr Ideen, mehr Innovation. Nur qualifizierte und engagierte Mitarbeiter ermöglichen dies. Deshalb bieten wir unseren Bewerbern ein vielseitiges, interessantes Tätigkeitsfeld mit hervorragenden Entwicklungsmöglichkeiten.

Mehr über das „Mehr“ unter  
[www.kasto.com](http://www.kasto.com)



Sägen. Lager. Mehr.

## Abstract

In the process of milling Nickel Based Alloys with Solid Ceramic End Mills, only Dry Mill Processing is currently possible. The cooling lubricants that are available can damage the end mill tools. However, the use of cooling lubricants in machining has benefits that cannot be exploited at this stage. Therefore, this project is seeking a cooling lubricant that enables and exploits the advantages of this usage. In the current project a first cooling lubricant has been developed, so further improvements will be expected.

## Zusammenfassung

Bei der Fräsbearbeitung von Nickelbasis-Superlegierungen mit einteiligen keramischen Schaftfräswerkzeugen ist derzeit nur die Trockenbearbeitung möglich. Die zur Verfügung stehenden Kühlschmierstoffe wirken sich nachteilig auf die Fräswerkzeuge aus. Grundsätzlich bietet die Verwendung von Kühlschmierstoffen in der Zerspanung Vorteile, die aber derzeit nicht ausgeschöpft werden können. Gesucht wird darum ein Kühlschmierstoff, der die Vorteile einer Kühlschmierung zum Tragen bringt. Im laufenden Projekt wurde bereits ein erster Kühlschmierstoff entwickelt, sodass weitere erfolgversprechende Schritte unternommen und Prozessparameter angepasst werden können.

## Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Sauer

Dipl.-Ing. (FH) Malte Blum

Akademische Mitarbeiter am Institute of Materials and Processes (IMP) der Hochschule Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Haas

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

## Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Malte Blum

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Institute of Materials and Processes (IMP)

Abteilung Fertigungstechnik und Produktion

Willi-Andreas-Allee 19

76131 Karlsruhe

E-Mail: [malte.blum@hs-karlsruhe.de](mailto:malte.blum@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925 2067

# Fließkurven von 30 Stählen als Grundlage für eine neue Datenbank

Simon Schmidt und Rainer Schwab

Bevor man einen Werkstoff für eine Anwendung in Erwägung ziehen kann, braucht man (neben vielen anderen Informationen) auch möglichst genaue Kenntnis über seine mechanischen Eigenschaften. Man möchte wissen, wie sich der Werkstoff in elastischer Hinsicht verhält, wie stark er sich plastisch verformen lässt, welche Kräfte und Spannungen er aufnehmen kann.

Belastet man zähe Werkstoffe mechanisch, so verhalten sie sich bei geringer Beanspruchung zunächst elastisch. Ein zylindrischer Stab beispielsweise, der nur wenig gedehnt wird, federt bei Entlastung wieder auf seine ursprüngliche Länge zurück, ähnlich einer Spiralfeder. Dehnt man einen Stab aber über seine Elastizitätsgrenze hinaus, so verformt er sich bleibend. Diese bleibende Verformung heißt in der Fachsprache auch plastische Verformung oder Fließen. Dehnt man den Stab dann immer weiter, so kommt es schließlich zum Bruch.

Die elastischen Eigenschaften isotroper Werkstoffe lassen sich mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und der elastischen Querkontraktionszahl  $\nu$  vollständig beschreiben. Isotrope Werkstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Eigenschaften richtungsunabhängig sind.

Die plastischen Eigenschaften drückt man mit der sogenannten Fließkurve aus. Bei ihr ist die im Zuge einer geeigneten Belastung auftretende wahre Spannung  $\sigma$  über der wahren plastischen Dehnung  $\epsilon_p$  aufgetragen.

Obwohl das mechanische Werkstoffverhalten von ausschlaggebender Bedeutung ist und obwohl weltweit täglich Hunderte von entsprechenden Werkstoffprüfungen durchgeführt werden, sind verlässliche und genau gemessene Fließkurven entweder nur punktuell oder mit großen Einschränkungen allgemein zugänglich. Berühmt ist der Fließkurven-Atlas [1], der aber auf die typischen Belange der Umformtechnik zugeschnitten ist, den Beginn der Fließkurven nicht enthält und nicht zwischen isothermer und adiabater Versuchsführung unterscheidet.

## Das neue Projekt

Die Idee für ein neues Projekt ist es, Fließkurven und weitere Werkstoffeigenschaften für eine Reihe von Werkstoffen physikalisch möglichst korrekt zu messen

und in einer Datenbank zusammenzufassen. Geplant ist, die Daten später im Internet allgemein zugänglich zu machen. Diese Daten dienen zum einen dazu, Bauteile aus diesen Werkstoffen korrekt auszulegen, vor allem mit der Finite-Elemente-Methode. Zum anderen sollen die Daten physikalische Zusammenhänge sichtbar machen und zu einem tieferen Verständnis der Werkstoffe beitragen.

## Das Versuchsprogramm

Gestartet wurde das Versuchsprogramm mit 30 viel verwendeten un- und niedriglegierten Stählen, die in Form von warmgewalztem Stangenmaterial mit 18 bis 25 mm Durchmesser vorliegen. In einer vorangegangenen Projektarbeit [2] wurden die Gefüge der Stähle schon metallografisch dokumentiert und die Fließkurvenermittlung vorbereitet.

Als Prüfmethode kommen grundsätzlich der Zugversuch, der Druckversuch, der Torsionsversuch und andere Belastungsarten in Betracht. Der Zugversuch hat den Vorteil einer klar definierten einachsigen homogenen Beanspruchung und der Reibungsfreiheit. Dies führt dazu, dass insbesondere der anfängliche Teil der Fließkurve bis zu mittleren plastischen Verformungen sehr genau zu messen ist. Der Hauptnachteil des Zugversuchs ist die Ausbildung einer Einschnürung ab einer bestimmten plastischen Dehnung, der Gleichmaßdehnung. Im Bereich der Einschnürung herrscht ein inhomogener mehrachsiger Spannungszustand, den man erst in einen homogenen einachsigen Spannungszustand umrechnen muss. Zudem ist die maximal erreichbare plastische Verformung bei Zugbeanspruchung naturgemäß begrenzt.

Trotz der Nachteile bekam der Zugversuch hier den Zuschlag, weil der anfängliche Teil der Fließkurve für viele Anwendungen wichtig ist und sehr genau gemessen werden kann. Im Bereich der Einschnürung dienen die Methoden von Siebel, Bridgman, Gromada et al. dazu, die wahren Spannungen näherungsweise zu berechnen. Hierzu müssen der Durchmesser und der Rundungsradius der Zugprobe während des Zugversuchs im Einschnürbereich möglichst genau optisch gemessen werden.

Der umfangreiche Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt.

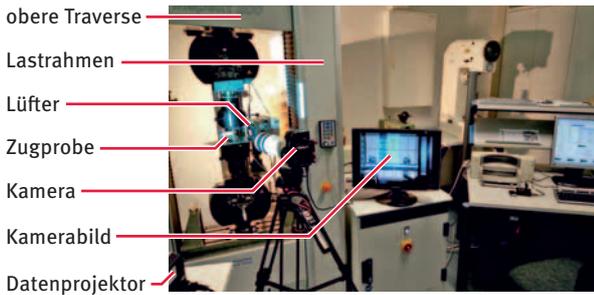


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung von Fließkurven (Foto: Simon Schmidt)

Die obere Traverse innerhalb des Lastrahmens der Zugprüfmaschine bewegt sich während des Zugversuchs langsam nach oben, nimmt die oberen Einspannteile mit und dehnt dadurch die Zugprobe. Die Kühlung der Probe übernimmt der rechts neben der Zugprobe angebrachte Lüfter. Die vor der Prüfmaschine aufgestellte hochauflösende Kamera mit Makro-Teleobjektiv dokumentiert die Probenkontur gegenüber dem hell erleuchteten Hintergrund. Links im Vordergrund ist ein Datenprojektor aufgestellt. Er projiziert einen Teil des Prüfmaschinen-Monitorbildes auf ein Schild mit Kalibriermaßstab, so dass die aktuelle Prüfkraft und ein Maßstab im aufgenommenen Bild enthalten sind.

Von jedem Werkstoff sind mindestens zwei Zugproben mit 10 mm Durchmesser und zylindrischem Prüfbereich angefertigt worden. Eine Probe davon dient dem kontinuierlich durchgeführten Zugversuch. Dabei wird die Probe äußerlich gleichmäßig langsam gedehnt, und zwar mit einer anfänglichen Dehngeschwindigkeit von etwa  $10^{-4}$  1/s (0,01 % pro Sekunde). Ein Zugversuch dauert dann etwa 20 bis 50 Minuten, je nach Werkstoff. Eine zweite identische Zugprobe wird in einem weiteren Zugversuch mit sprunghaft variiertem Dehngeschwindigkeit von  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  und  $10^{-2}$  1/s beaufschlagt. Dabei bleibt die Dehngeschwindigkeit nur über einen kleinen Bereich von Dehnungen konstant und ändert sich dann sprunghaft in einem vorgegebenen System. Auf diese Art lässt sich die Reaktion des Werkstoffs auf verschiedene Dehngeschwindigkeiten ermitteln, die sogenannte Dehnratenempfindlichkeit. Zwei Haltephasen während des Zugversuchs von je 20 Minuten Dauer dienen dazu, die statischen Fließspannungen (bei Dehngeschwindigkeit null) zu messen. Eine geeignete Versuchsführung und die Probenkühlung sorgen dafür, dass sich der Probenwerkstoff bei den Zugversuchen nur wenig über 20°C erwärmt.

Inzwischen wurden die 30 verschiedenen Stähle geprüft und überwiegend ausgewertet. Ein typisches teilausgewertetes Ergebnis zeigt die Abbildung 2.

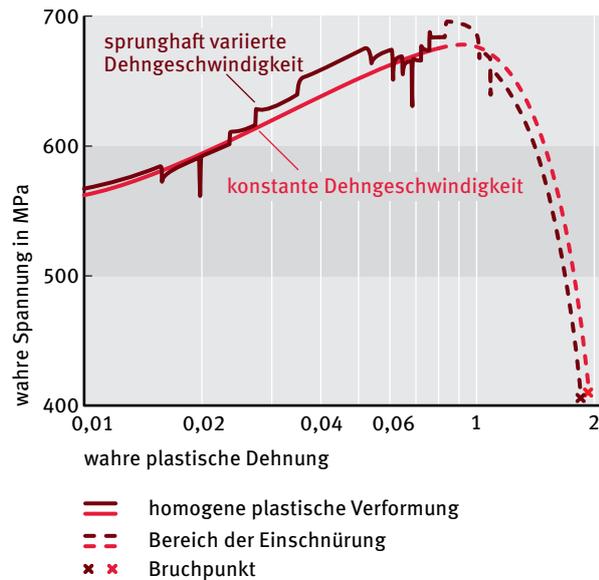


Abb. 2: Beispiel für eine Fließkurve, teilausgewertet, Stahl 18CrNi8 im weichgeglühten Zustand

Das Diagramm ist halblogarithmisch skaliert. Die wahre Spannung ist linear auf der Ordinate aufgetragen, die wahre plastische Dehnung auf der Abszisse logarithmisch. Diese Darstellungsweise hilft dabei, den anfänglichen Teil der Fließkurve bei geringen plastischen Dehnungen im Vergleich zu den größeren Dehnungen sinnvoll darzustellen und physikalische Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Die Auswertung und Darstellung der Fließkurve im Einschnürbereich ist in Abbildung 2 noch unvollständig. Die gestrichelten Bereiche der Fließkurven müssen noch in die korrekten Spannungen und Dehnungen umgerechnet werden.

### Erste Ergebnisse

Obwohl sich die Untersuchungen noch länger hinziehen werden, zeichnen sich erste physikalische Zusammenhänge ab. Interessant sind die sehr unterschiedlichen Formen des Fließbeginns von völlig fehlender bis zu ganz ausgeprägter Streckgrenze. Stähle mit einem hohen Anteil an homogenen Ferritkristallen im Gefüge tendieren eher zu einer ausgeprägten Streckgrenze und sie zeigen eher einen linearen Verlauf der Fließkurve in halblogarithmischer Darstellung.

### Literatur

[1] E. Doege, H. Meyer-Nolkemper, I. Saeed, *Fließkurven-Atlas metallischer Werkstoffe*, Hanser-Verlag, 1986.

[2] S. Bintz, N. Fillinger, *Ermittlung der Fließkurven und Gefüge von einigen häufig gebrauchten Stählen*, Projektarbeit an der Fakultät MMT der Hochschule Karlsruhe, 2015.

**Abstract**

Material flow curves (true stress as a function of true plastic strain) are the absolute basis for the mechanical design of components and workpieces. Unfortunately, physically clearly measured flow curves are either very limited or not widely available. In a new project, flow curves of 30 different steels are determined using appropriate tensile tests up to the necking range. The tests are conducted isothermally and at different strain rates. The first results are promising.

**Zusammenfassung**

Fließkurven von Werkstoffen (wahre Spannung in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnung) sind die absolute Grundlage für die mechanische Auslegung von Bauteilen und Werkstücken. Leider sind physikalisch eindeutig gemessene Fließkurven entweder nur sehr eingeschränkt oder gar nicht allgemein verfügbar. In einem neuen Projekt werden Fließkurven von 30 verschiedenen Stählen anhand

geeigneter Zugversuche bis in den Bereich der Einschnürung ermittelt. Die Versuche laufen isotherm und bei verschiedenen Dehngeschwindigkeiten ab. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend.

**Autoren**

**Simon Schmidt B.Sc.**

Absolvent des Studiengangs Maschinenbau an der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Rainer Schwab**

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

**Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Rainer Schwab

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [rainer.schwab@hs-karlsruhe.de](mailto:rainer.schwab@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-1902

## Steinbeis – Transferpartner der Hochschule Karlsruhe

Die Hochschule Karlsruhe und Steinbeis arbeiten seit vielen Jahren sehr erfolgreich im unternehmerischen Wissens- und Technologietransfer zusammen, seit 2008 ist das Kooperationsunternehmen Steinbeis Transferzentren GmbH an der Hochschule Karlsruhe aktiv. Mit dem Steinbeis-Haus Karlsruhe wurde 2015 Raum für Wissenschaftler der Hochschule, Steinbeis wie auch KMU geschaffen.

Steinbeis unterstützt Professoren, Mitarbeiter, Studierende und Absolventen der Hochschule dabei, ihr fachliches Know-how im Einklang mit ihrer wissenschaftlichen Arbeit in maßgeschneiderte Problemlösungen für insbesondere kleine und mittlere Unternehmen einzubringen. Davon profitieren Hochschule und Wirtschaft gleichermaßen: die Praxisnähe sichert die Aktualität der Lehre, der wissenschaftliche Fortschritt der Hochschule fördert direkt den Marktvorsprung der Unternehmen.

Steinbeis-Stiftung | [www.steinbeis.de](http://www.steinbeis.de)



## Steinbeis

Technologie.Transfer.Anwendung.

Veranstaltungen  
im  
Steinbeis-Haus Karlsruhe



Produkte von E.G.O. stehen nicht im Rampenlicht – sie spielen die entscheidende Rolle im Hintergrund. Heiz- und Steuerelemente von E.G.O. machen aus Hausgeräten erst das, wozu wir sie brauchen: zu nützlichen Helfern, die das Leben leichter machen. Weltweit führend in Hightech für Hausgeräte: Kochen. Backen. Waschen. Spülen. Trocknen. Regeln. Steuern.

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



Hightech seit 1931.

E.G.O. – steht nie drauf.  
Steckt immer drin.



# Akustische Bestimmung des Restitutionskoeffizienten einer Kugel im freien Fall

Christof Krülle

## Einleitung

Schon Sir Isaac Newton erkannte, dass beim teilelastischen Stoß von harten Kugeln kinetische Energie verloren geht.[1] Quantitativ wird dieser Energieverlust dargestellt durch die Stoßzahl  $k$ , die auch als Restitutionskoeffizient  $e$  bezeichnet wird.  $e$  ist das Verhältnis der Kugelgeschwindigkeiten vor und nach einem Stoß. Für den Aufprall eines Teilchens auf eine flache horizontale Unterlage wurden Restitutionskoeffizienten für viele Partikelarten und Oberflächen gemessen. Dagegen erweist sich die theoretische Beschreibung dieser Stoßvorgänge als komplexes Kontinuumsmechanisches Problem.[2] Der Energieverlust kann z.B. durch innere Reibung im aufprallenden Objekt erklärt werden oder durch permanente Verformungen der Teilchenoberfläche sowie der Unterlage und kann näherungsweise vorhergesagt werden aus Messungen der mechanischen Hysterese, also des nach dem Stoßvorgang verbleibenden Kompressionsanteils der Kugel in Abhängigkeit der ausgeübten Kraft. Jedoch muss hier zwischen statischer und dynamischer Kompression unterschieden werden. Es zeigt sich, dass der Energieverlust und damit der Restitutionskoeffizient stark davon abhängt, mit welcher Geschwindigkeit die Kollision stattfindet. Für die Praxis sind Erkenntnisse über diese Vorgänge unter anderem relevant für die Beschreibung von Schüttgütern. Für die numerische Modellierung eines größeren Ensembles von mikroskopischen Teilchen sind die Einzelpartikelstöße möglichst genau zu berücksichtigen, um die makroskopischen Eigenschaften des Gesamtsystems korrekt zu erfassen.

## Experimentelles Verfahren

Im Gegensatz zur komplizierten theoretischen Behandlung der Stoßvorgänge gibt es eine sehr einfache und

praktikable Methode zur Bestimmung des Restitutionskoeffizienten, die 1981 von Alan D. Bernstein vorgeschlagen wurde [3, 4]: Das von einer frei fallenden und im Anschluss mehrfach aufprallenden Kugel erzeugte typische Klackgeräusch wird mit Hilfe eines Mikrofons, das über eine Soundkarte an einem PC angeschlossen ist, mit hoher Zeitaufösung aufgezeichnet (s. Abb. 1).

Aus den Audiodaten kann der Restitutionskoeffizient leicht als Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Zeitintervalle zwischen den Tonsignalen wie folgt bestimmt werden: Die Flugzeit  $\Delta t_n = 2 v_n/g$  auf der ballistischen Bahn zwischen zwei Kollisionen wird (bei Vernachlässigung der Luftreibung) durch die nach jedem Stoß verbleibende vertikale Geschwindigkeitskomponente  $v_n$  bestimmt. Daraus folgt für den Restitutionskoeffizienten

$$e \equiv \frac{v_{n+1}}{v_n} = \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n}$$

Zusätzlich ließe sich im Prinzip der Restitutionskoeffizient auch aus den maximalen Steighöhen  $h_{\max}$  bestimmen. Hierfür gilt wegen der Energieerhaltung  $\frac{1}{2} mv^2 = mgh_{\max}$ :

$$e \equiv \frac{v_{n+1}}{v_n} = \sqrt{\frac{h_{\max, n+1}}{h_{\max, n}}}$$

Die Analyse der Steighöhen  $h_{\max}$  mittels Hochgeschwindigkeitskamera und Bildverarbeitung ist aber bei weitem aufwändiger und ungenauer.

Die Zeitintervalle  $\Delta t_n$  lassen sich aus den Audiodaten leicht gewinnen, indem man eine Schwellenspannung deutlich oberhalb des Grundrauschens setzt, bei der ein Aufprall erfolgt sein muss. Alternativ könnte man

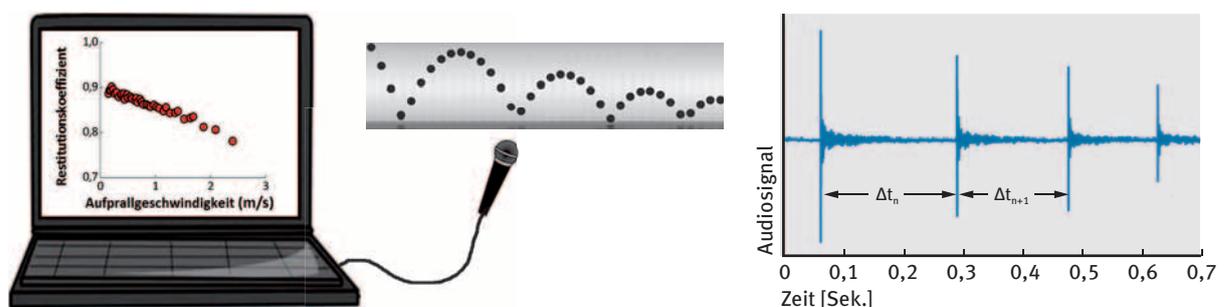


Abb. 1: Skizze des experimentellen Aufbaus mit Zeitserie einer frei fallenden Kugel, simultan aufgenommen sowohl mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit Aufnahmezeitrate 1000 fps als auch mit einem Mikrophon mit Aufnahmezeitrate 48 kHz

(Fotomontage: Christof Krülle)

auch die markante Signalform für das erste Auftreffen detektieren und abspeichern. Wenn man anschließend diese Daten mit allen weiteren kreuzkorreliert, erhält man markante Signalspitzen bei den Aufschlagzeiten. Die mit heutigen kommerziellen Soundkarten leicht erreichbare hohe Aufnahme rate von 48 kHz erlaubt es, die relevanten Zeitintervalle zwischen den Aufschlägen auf Bruchteile von Millisekunden genau zu bestimmen. Die relative Unsicherheit für die daraus ermittelten Restitutionskoeffizienten liegt im Subpromillebereich. Im Prinzip funktioniert das Verfahren noch für Auftreffgeschwindigkeiten kleiner als 0,01 m/s, das sind letzte Hüpfen mit einer Steighöhe von 5 µm!

**Ergebnisse und Diskussion**

Besonders auffallend bei der Durchführung dieser Experimente ist, dass der Restitutionskoeffizient keine Konstante darstellt, sondern deutlich von der Aufprallgeschwindigkeit abhängt. Abbildung 2 zeigt Messungen für drei Glaskugeln mit unterschiedlichen Durchmessern zwischen 10 und 14 mm.[5] Für alle drei Kugelgrößen lässt sich in erster Näherung der Abfall des Restitutionskoeffizienten mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit durch eine Regressionsgerade beschreiben. Deutlich erkennbar ist die Abhängigkeit von der Kugelgröße. Bei kleineren Kugeln ist der Energieverlust beim Stoß geringer und damit der Restitutionskoeffizient höher.

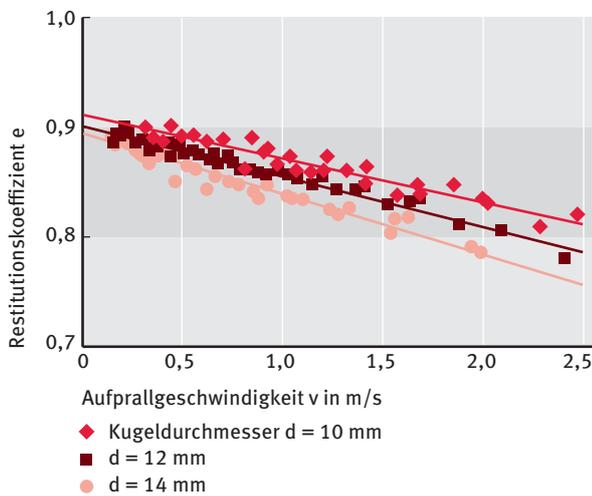


Abb. 2: Restitutionskoeffizient  $e$  als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit  $v$  von Glaskugeln mit verschiedenen Durchmessern  $d$

Auch das Kugelmaterial spielt eine Rolle (s. Abb. 3). Um bei diesen Messungen eine Vergleichbarkeit zu erzielen, wurde immer die gleiche Unterlage, eine 4 cm starke Glasplatte verwendet. Obwohl sich die Restitutionskoeffizienten für Glas, Stahl und Messing sehr ähneln, kann das Verfahren klar zwischen den drei Materialien unterscheiden. Noch deutlicher wird die

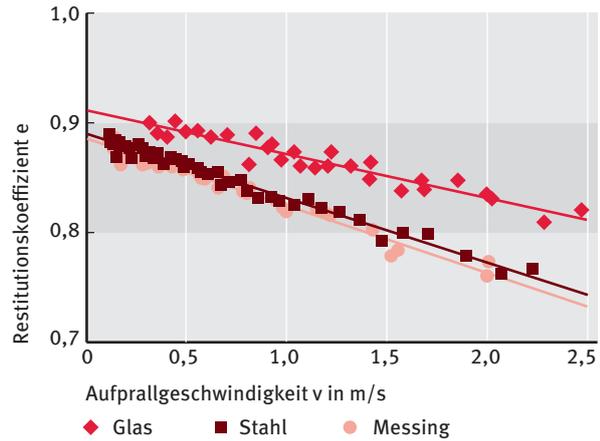


Abb. 3: Restitutionskoeffizient  $e$  als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit  $v$  von Kugeln mit Durchmesser  $d = 10$  mm verschiedener Materialien

Materialabhängigkeit für Aluminium- oder Bleikugeln, für die man Werte unter 0,5 erhält.

Eine weitere Abhängigkeit des Restitutionskoeffizienten von Eigenschaften der Kugeln wurde erst nach der Durchführung einer großen Anzahl von Messungen erkannt [6]: Bei drei Kugeln aus unterschiedlichem Material (Stahl, Glas und Plastik) ergaben sich bei mehrfacher Wiederholung der Experimente deutlich unterschiedliche Streuungen der Messdaten (s. Abb. 4): bei Stahlkugeln am geringsten und bei Plastik kugeln am stärksten. Dieses Verhalten lässt sich durch unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten erklären. Genauere Untersuchungen der Kugeloberflächen im Rasterelektronenmikroskop sowie numerische Simulationen [7, 8] bestätigen diese Hypothese.

**Ausblick**

Die vorgestellte Methode zur Bestimmung des Restitutionskoeffizienten beim Aufschlag einer frei fallenden Kugel auf eine harte Oberfläche zeigt, dass es leicht möglich ist, die Abhängigkeit von Aufprallgeschwindigkeit, Kugelgröße, Material und Oberflächenrauigkeit mit großer Präzision zu messen. In Zukunft könnte man das Verfahren darüber hinaus auch leicht nutzen, um durch das Fallenlassen einer definierten Testkugel auf unbekannte flache Unterlagen deren lokale Oberflächeneigenschaften wie Materialzusammensetzung oder Rauigkeit „abzuklopfen“.

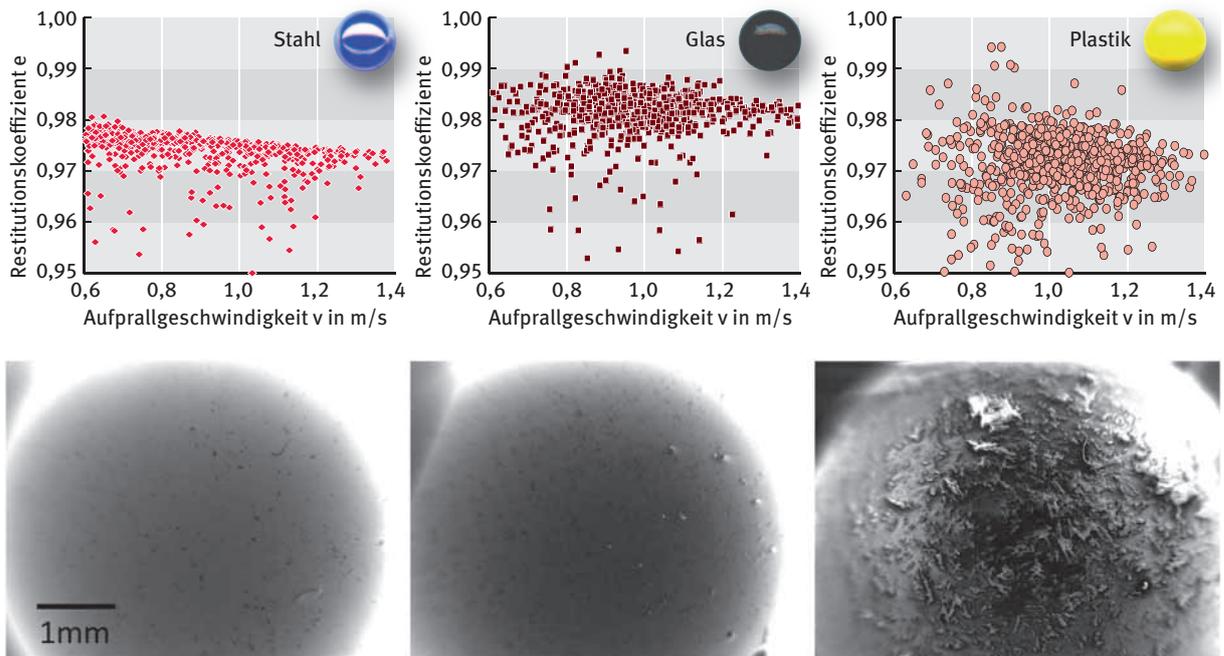


Abb. 4: Restitutionskoeffizient  $e$  als Funktion der Aufprallgeschwindigkeit  $v$  von Kugeln aus Stahl, Glas und Plastik sowie rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ihrer Oberfläche (Fotos: Christof Krülle)

**Abstract**

Partially elastic collisions of hard spheres with a flat surface lead to energy losses which are described quantitatively by a “coefficient of restitution”, which is the ratio of impact and rebound velocities. A very simple and practical method analyzes the typical ticktack sound generated by the multiple collisions of a ball bouncing on an underlying plane, recorded by a microphone connected to the sound card of a computer. The restitution coefficient can easily be derived as the ratio of successive time intervals between sound signals. Our measurements show that the coefficient of restitution depends on the impact velocity. Furthermore, the size, material and surface roughness of the bouncing spheres also play a role.

**Zusammenfassung**

Beim teilelastischen Stoß von harten Kugeln untereinander oder mit einer ebenen Unterlage geht kinetische Energie verloren. Quantitativ wird dieser Energieverlust durch die Stoßzahl beschrieben. Auch Restitutionskoeffizient genannt, beschreibt sie das Verhältnis von Rückkehr- zu Aufprallgeschwindigkeit. Eine sehr einfache und praktikable Methode ihrer Bestimmung besteht darin,

eine Kugel frei auf eine harte Unterlage fallen zu lassen. Das von der mehrfach aufprallenden Kugel erzeugte typische Klackgeräusch wird mit Hilfe eines Mikrofons, das über eine Soundkarte an einem PC angeschlossen ist, mit hoher Zeitauflösung aufgezeichnet. Aus den Audiodaten kann der Restitutionskoeffizient leicht als Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Zeitintervalle zwischen den Tonsignalen bestimmt werden. Experimentelle Befunde zeigen, dass der Restitutionskoeffizient von der Aufprallgeschwindigkeit abhängt. Darüber hinaus haben auch Kugelgröße, Material und Oberflächenrauigkeit einen deutlichen Einfluss.

**Autor**

Prof. Dr. rer. nat. habil. Christof Krülle  
 Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik an der Hochschule Karlsruhe

**Kontakt**

Prof. Dr. rer. nat. habil. Christof Krülle  
 Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
 Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
 Moltkestraße 30  
 76133 Karlsruhe  
 E-Mail: christof.kruelle@hs-karlsruhe.de

## Referenzen

- [1] I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Royal Soc. Press, London, 1686.
- [2] W. J. Stronge, *Impact mechanics*, Cambridge University Press, 2000.
- [3] A. D. Bernstein, *Listening to the coefficient of restitution*, Am. J. Phys. 45, 1981, pp. 41-44.
- [4] I. Stensgaard, E. Lægsgaard, *Listening to the coefficient of restitution - revisited*, Am. J. Phys. 69, 2001, pp. 301-305.
- [5] A. Butsch, C.A. Krülle, I. Rehberg, *Acoustic measurements of velocity-dependent coefficients of restitution*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 2005.
- [6] C. A. Krülle, *Can one hear the shape of a ball?*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, 2006.
- [7] M. Montaine, M. Heckel, C. A. Krülle, T. Schwager, T. Pöschel, *Coefficient of restitution as a fluctuating quantity*, Physical Review E 84, 2011, 041306-1-5.
- [8] M. Heckel, A. Glielmo, N. Gunkelmann, T. Pöschel, *Can we obtain the coefficient of restitution from the sound of a bouncing ball?*, Physical Review E 93, 2016, 032901-1-10.

**OPUS MUNDI**  
DEINE ARBEITSWELT

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

Bei **UNS** findest **DU** Deinen **Traumberuf!**

Hol' Dir die App!

[app.opusmundi.de](http://app.opusmundi.de)

The advertisement features a blue and orange logo for OPUS MUNDI. The background is orange with a word cloud of various engineering and scientific fields in white and blue text, including: Verfahrenstechnik, Chemie, Nachrichtentechnik, Automatisierungstechnik, Informatik, Schiffsbau, Geowissenschaften, Elektrotechnik, Bauingenieurwesen, Architektur, Nachrichtentechnik, Flugzeugsystemtechnik, Gebäudetechnik, Fahrzeugtechnik, Physik, Architektur, Klimatik, Maschinenbau, Betriebswirtschaft, and Bauingenieurwesen. A white smartphone is shown on the right, displaying the OPUS MUNDI app interface. A QR code is located at the bottom right, and the website URL is provided at the bottom.

# Knallgas reloaded: Wie verläuft der Übergang zwischen Deflagration und Detonation?

Heiko May und Jens Denecke

## Einleitung

In Anlagen der Chemieindustrie, zur Energieumwandlung oder im Öl- und Gasbereich werden Gefährdungsanalysen durchgeführt. Dabei können in Rohrleitungen und Apparaten Situationen nicht ausgeschlossen werden, in denen gleichzeitig zündfähige Gemische und eine Zündquelle vorliegen, sodass die Gemische dann explosionsartig verbrennen.[1, 2]

Anstelle der umgangssprachlichen Explosion werden in der Verbrennungstechnik die Regime Deflagration und Detonation unterschieden. Die Deflagration entspricht einer Verbrennung mit geringer Druckerhöhung wie wir sie häufig im Alltag erleben, zum Beispiel bei einem Gasbrenner, um Bitumenbahnen zu verschweißen. Bei einer Detonation ist die Verbrennungsreaktion dagegen mit einer starken Druckwelle gekoppelt und wenn sie auftritt, führt sie zu großen Schäden von Anlagen, Gebäuden und Menschen.

Die zerstörerische Kraft dieses physikochemischen Phänomens konnte auch bei der Reaktorkatastrophe des Kernkraftwerks Fukushima Daiichi im März 2011 beobachtet werden. Aufgrund der enormen Überhitzung der Brennstäbe im Abklingbecken von Block 3 kam es zunächst zu einer thermischen Zersetzung des Kühlwassers in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Dieses Knallgas bzw. Oxyhydrogen genannte Gasgemisch reagierte dann nach Notentspannung in das Reaktorgebäude in einer stark exothermen Reaktion zu Wasser und zerstörte die Gebäudehülle. Außerdem setzten Kernreaktionen ein, die so heftig waren, dass Teile der Brennstäbe noch zwei Meilen abseits von Block 3 gefunden wurden.[10, 11]

Die Zündung eines vorgemischten Gases führt häufig zunächst zu einer Deflagration. Dann beschleunigt sich die Flammenfront und schlägt unter bestimmten Bedingungen in eine Detonation um. Dieser besonders

kritische Übergang wird DDT genannt (Deflagration to Detonation Transition). Die Voraussetzungen und Mechanismen dieses Umschlags sind seit langer Zeit Gegenstand der industriellen Forschung, insbesondere da der DDT-Druck zu diesem Zeitpunkt jenen einer stabilen Detonation nochmals um ein Vielfaches übersteigt.

Mit zunehmendem Einsatz der Wasserstofftechnologie im Rahmen der Energiewende gewinnt die Frage nach dem Umschlag der Verbrennungsregime an Bedeutung.[3] Daher wurde diese Fragestellung an der Hochschule Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der BASF SE unter Verwendung von detaillierten Simulationen an einfachen Geometrien grundlegend untersucht. Erste Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

## Grundlegende Experimente

Um Gefahren in Prozessanlagen zu vermeiden, müssen Rohrleitungen, Armaturen und Apparate entweder dem DDT-Druck standhalten oder dieser muss verhindert werden. Leider gibt es für die Bewertung noch kein Modell, das die thermodynamischen Endzustände Druck und Temperatur und die Lauflänge der Flamme bis zum DDT in Abhängigkeit der Initialbedingungen prognostizieren kann. Für die Anlagenplanung müssen daher aufwendige Einzelversuche durchgeführt werden.[5] Bei diesen Experimenten wird ein brennbares Gemisch unter verschiedensten Initialbedingungen, zum Beispiel in einem beidseitig verschlossenen Rohr, gezündet, um die entstehenden maximalen Drücke von mehreren 100 bar und die resultierende Verformung der Rohrwand zu messen.[4]

Die durch die Zündung entstehende Flamme schreitet zunächst als Deflagration voran und wird zunehmend schneller, ehe sie nach einem Übergangszustand schließlich in eine Detonation umschlägt. Die experimentellen Resultate von Schildberg [5] weisen darauf hin, dass der Spitzendruck genau in dem Moment

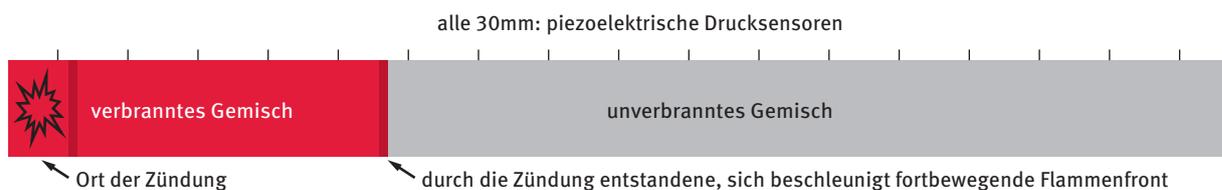


Abb. 1: Schematischer Aufbau von Experiment und Simulation

erreicht wird, bei dem der Ausbreitungsmechanismus der Flamme von einer Deflagration zu einer Detonation wechselt. Außerdem konnten von Schildberg [5] die wesentlichen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die Rohrlänge sowie Reflexionen und Überlagerungen von Druckwellen ermittelt werden.

Um den Mechanismus des DDT zu verstehen und um zukünftig auch ohne aufwendige Experimente die auftretenden Drücke eines DDT prognostizieren zu können, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts detaillierte numerische Simulationen durchgeführt.

**Numerische Simulation**

Die besondere Herausforderung bei der Simulation eines DDT ist die Tatsache, dass die Interaktion der Geometrie, der Thermofluidodynamik, der Turbulenz und der auftretenden chemischen Reaktionen zeitlich instationär beschrieben werden müssen. Insbesondere die Chemie stellt einen hohen Anspruch an die Zeitschrittweite, da sehr viele schnelle chemische Nebenreaktionen als Netzwerk interagieren. Zur Modellierung der komplexen Reaktionskinetik wird der sogenannte „GRI-Mech“ [6] eingesetzt, ein Reaktionsmechanismus, der für jede auftretende Nebenreaktion in Abhängigkeit der Temperatur Reaktionskonstanten angibt und auch Stoffeigenschaften, wie z.B. die Wärmekapazität der beteiligten Spezies bereitstellt. Die partiellen Differentialgleichungen der Chemie, der Erhaltungssätze und der Turbulenz werden mit der Finite-Volumen-Methode gelöst. Die Turbulenz wird über das SST k-omega model abgebildet. Aufgrund der langen Simulationsdauer war eine Eins-zu-Eins-Umsetzung der Experimente nicht sinnvoll und der experimentelle Aufbau wurde auf einen kleineren Maßstab skaliert. Tabelle 1 zeigt beispielhaft die Initialbedingungen des Experiments Nr. 7 von Schildberg [5] und der dazugehörigen Simulation. Darin sind auch die reduzierten Maße der Rohrgeometrie und der Zündenergie aufgeführt. Die stärkste Vereinfachung ist jedoch die Reduktion auf ein zweidimensionales

	Experiment	Simulation
Mischung	Stöchiometrische H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> mit 14,782 O <sub>2</sub> Vol.-%	
Initialdruck	12,2 bar	
Initialtemperatur	293 K	
Rohrdimensionen	114,3 x 10000 (Ø [mm] x Länge [mm])	3,5 x 1000 (Ø [mm] x Länge [mm])
Zündenergie	20 J	0,06 J
Leitfähigkeit Rohr	16,2 W/(m K)	adiabatisch
Rauheit Rohr	max. Rauigkeit 6,4 µm	hydraulisch glatt
Dimension	3D	2D-achsensymmetrisch

Tab. 1: Randbedingungen bei Experiment und Simulation

achsensymmetrisches Modell. Wandwärmeübergang und Strahlung sind keine relevanten Einflussfaktoren und wurden daher nicht modelliert.

Vorsimulationen zeigten, dass eine Zellgröße von 0,1 mm bis 0,2 mm ein verlässlicher Kompromiss bezüglich Simulationsdauer und Genauigkeit ist. Für die zeitliche Integration wird ein implizites Euler-Verfahren mit einer Zeitschrittweite von 10<sup>-7</sup> s bis 10<sup>-8</sup> s angewendet, womit die numerischen Stabilitätsbedingungen eingehalten werden.

**Analyse der Ergebnisse**

Die Resultate der Simulation lassen sich anhand von Abbildung 2 und 3 verdeutlichen. Am linken Rohrende wurde das Gemisch gezündet. Die Flammenfront in Abbildung 2 bewegt sich durch das unverbrannte Gemisch auf das rechte Rohrende zu.

Auch hinter der Flammenfront kommt es lokal noch zu heftigen chemischen Ausgleichsreaktionen, da die Verbrennung des Wasserstoffs durch die Flammenfront unvollständig ist. Sie sind in Abbildung 2 als Mini-Nachzündungen skizziert. Da diese Reaktionen im verbrannten Gemisch stattfinden, beläuft sich die Temperatur auf ca. 2 800 K. Aufgrund dieser hohen Temperatur sind die chemischen Reaktionen trotz geringem Wasserstoffumsatz extrem schnell. Die Ausgleichsreaktionen laufen gekoppelt an Druckwellen auf die Flammenfront zu und überholen diese. Dadurch kommt



Abb. 2: Chemische Ausgleichsreaktionen im verbrannten Gemisch

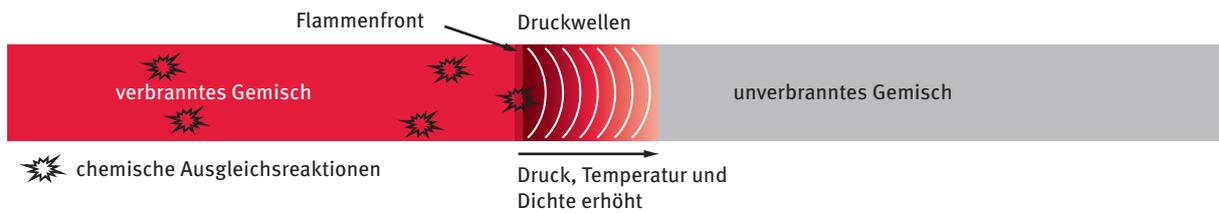


Abb. 3: Druckwellenerzeugung aufgrund chemischer Ausgleichsreaktionen

es zu einem starken Anstieg der Radikalbildung und Energiefreisetzung im Bereich der Flammenfront, wobei weitere Druckwellen erzeugt werden. Wie in Abbildung 3 skizziert, laufen die Druckwellen in das unverbrannte Gemisch und erhöhen ohne chemische Reaktion dessen Druck und Temperatur. Durch diese erhöhten thermodynamischen Zustandsgrößen wird die Flammenfront zunehmend beschleunigt, da sie immer mehr Brennstoff pro Volumeneinheit umsetzt. Dies ist der dominante Flammenfront-Beschleunigungsmechanismus.

Mit jeder neuen Druckwelle nehmen die thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Teilchendichte im unverbrannten Gemisch zu, was die sogenannte Zündverzugszeit absenkt. Sie ist die Zeit, die ein Gemisch benötigt, um in einem Netzwerk von Nebenreaktionen Radikale zu bilden, ehe mit der Wasserbildung die Energiefreisetzung beginnt.[7] Die stabile Detonation setzt voraus, dass die Zündverzugszeit der Flammenfront so extrem klein ist, dass durch ihre Energiefreisetzung die Druckwelle selbst erzeugt wird.[8]

Bei einer klassischen Detonation reicht eine einzige sehr starke Druckwelle aus einer energiereichen Initialzündung zur Erzeugung der benötigten Zündverzugszeit aus. Bei einer Deflagration als Initialzündung existiert jedoch keine einzelne starke Druckwelle. Allerdings kommt es zu einer Überlagerung vieler Druckwellen, die aus den Ausgleichsreaktionen stammen (s. Abb. 3). Die gasdynamische Druckwellenüberlagerung lässt den Druck stärker ansteigen als die Temperatur. Da aber sowohl Druck als auch Temperatur für die Zündverzugszeit verantwortlich sind, muss ein sehr hoher Druck die niedrigere Temperatur kompensieren. Nach einer diskreten Anzahl von überlagerten Druckwellen wird die Zündverzugszeit ausreichend gering und die Deflagration schlägt in eine Detonation um.

Die Eigenschaften einer Detonation lassen sich auch mittels des sogenannten Von-Neumann-Zustands vorhersagen.[8] Dies ist eine gasdynamische Berechnungsmethode, um jenen Zustand zu finden, der die Zündverzugszeit auf ein detonationsfähiges Niveau herabsetzt. Dieser Von-Neumann-Zustand basiert auf dem Zeldovich-Von Neumann-Döring-Detonationsmo-

del [7] und ist vergleichsweise leicht berechenbar. Durch den Verständnissgewinn aus der numerischen Simulation wurde für einige Versuche von Schildberg nachgewiesen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Von-Neumann-Zustand und dem DDT-Druck existiert. Als wesentliches Ergebnis dieses Forschungsprojekts ergibt sich damit, dass dieser Von-Neumann-Zustand für die ingenieurtechnische Vorhersage des DDT-Spitzen drucks zukünftig nutzbar sein könnte.

#### Danksagung

An dieser Stelle möchten die Autoren die intensiven und erkenntnisreichen Diskussionsrunden mit Herrn Dr. Schildberg und dessen Kollegen der BASF SE besonders hervorheben, ohne die die dargestellten Ergebnisse in diesem Umfang nicht möglich gewesen wären.

#### Literatur

- [1] Hydrogen Tools, *Lessons Learned - Improper Purging Procedure Results in Hydrogen Fire*, 21.12. 2006 [Online]. Available: <https://h2tools.org/lessons/improper-purging-procedure-results-hydrogen-fire>, (Zugriff am 01. 09. 2016).
- [2] V. Molkov, *Hydrogen Safety Research: State-of-the-Art*, in Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh, UK, 23. - 27. 04. 2007.
- [3] A. Dahoe, *Tutorial on Deflagrations and Detonations*, Joint European Summer School on Fuel Cell and Hydrogen Technology, University of Ulster, United Kingdom, 2011.
- [4] H.-P. Schildberg, *The course of the explosions of combustible/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixtures*, Forsch. Ingenieurw., pp. 33-65, 2009.
- [5] H.-P. Schildberg, *Experimental Determination of the Static Equivalent Pressures of Detonative Explosions of Stoichiometric H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Mixtures in Long and Short Pipes*, ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Juli 2015, PVP2015-45286.

- [6] Smith et al., *GRI-Mech Homepage*, Gas Research Institute, Chicago, IL, [Online]. Available: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>. (Zugriff am 01.09.2006).
- [7] J. Warnatz, U. Maas und R. Dibble, *Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*, Springer-Verlag, 2001.
- [8] F. Bartlmä, *Gasdynamik der Verbrennung*, Springer-Verlag, 1975.
- [9] H.-P. Schildberg, J. P. M. Smeulers, G. Pape, *Experimental Determination of the Static Equivalent Pressures of Gas Phase Detonations in Pipes and Comparison with Numerical Models*, Proceedings of the 2013 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2013-97677), 14. - 18.07.2013, Paris, France.
- [10] M. Ivanov, A. Kiverin, I. Yakovenko und M. Liberman, *Hydrogeneoxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls*, International Journal of Hydrogen Energy, 2013.
- [11] A. Gundersen, *Fairewinds Energy Education*, 2011, [Online]. Available: <http://www.fairewinds.org/nuclear-energy-education/gundersen-postulates-unit-3-explosion-may-have-been-prompt-criticality-in-fuel-pool>.

### Abstract

In this study numerical simulations of the combustion of hydrogen-air-mixtures (oxyhydrogen) were conducted. The objective was to predict the maximum occurring pressure and its position in a long pipe. The maximum pressure occurs at the deflagration to detonation transition (DDT). The results of this study indicate that equalizing reactions in the already burned mixture create pressure waves that accelerate the flame front into the unburned mixture up to the DDT.

### Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden numerische Simulationen der Verbrennung von Wasserstoff-Luft-Gemischen (Knallgas) durchgeführt. Ziel war es, den maximal auftretenden Druck und seinen Ort in einer langen Rohrleitung vorherzusagen. Dieser maximale Druck tritt am Übergang der Deflagration zur Detonation (DDT) auf. Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass Ausgleichsreaktionen im bereits verbrannten Gemisch Druckwellen erzeugen, die dann im unverbrannten Gemisch die Flammenfront bis zum DDT beschleunigen.

### Autoren

**Heiko May M.Sc.**

Absolvent des Masterstudiengangs Wirtschaftsingenieurwesen an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Jens Denecke**

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jens Denecke  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: [jens.denecke@hs-karlsruhe.de](mailto:jens.denecke@hs-karlsruhe.de)  
Telefon: 0721 925-1702



**Finden Sie uns auf Facebook**  
**[www.facebook.com/vmkverlag](http://www.facebook.com/vmkverlag)**

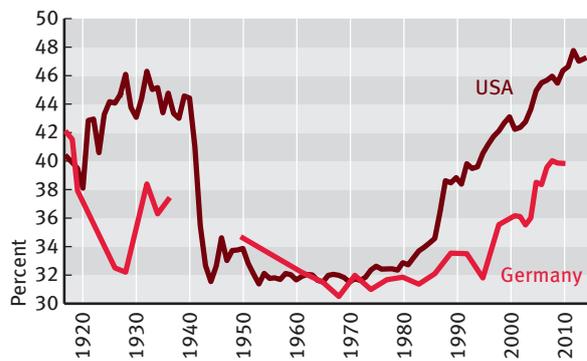


# Inequality in Germany and the United States: Trends, Policies and Macroeconomic Implications

Hagen Krämer

Since the beginning of the recent financial crisis, the topic of income and wealth inequality has regained attention. In 2013, the United Nations declared the issue of (income) inequality both between and within countries to be a part of the post-2015 development framework (UNCDF 2013). Research on the topic of income distribution has received a lot of attention in the public debate during recent years. Important contributions in this field have been made by Wilkinson and Pickett (2010), Stiglitz (2012) and in particular by Piketty (2014). In this context, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) has launched several seed funds for collaborative research activities in the field of inequality. One of these funds financed a joint research project between Bielefeld University, The Karlsruhe University of Applied Sciences, and the New School for Social Research, New York, in 2015-16.

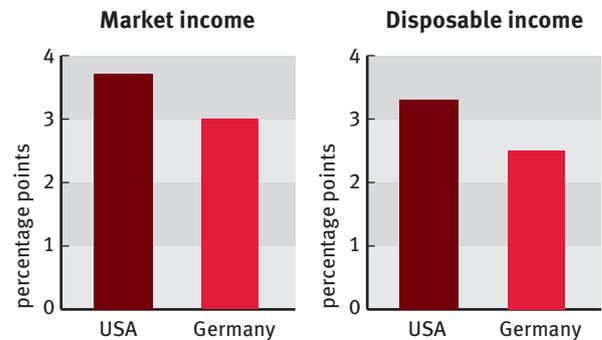
Most of the current analyses do not focus on the already intensively discussed topic of poverty, but examine top incomes and the overall income distribution within different countries or the evolution of income shares of different population groups over time (cf. figure 1).



Source: Alvaredo et al. (2015). Data refer to real gross income per tax unit. Income includes capital gains, Germany 1948-2010.

Fig. 1: Top decile income share in the USA 1917-2014 and in Germany 1917-2010

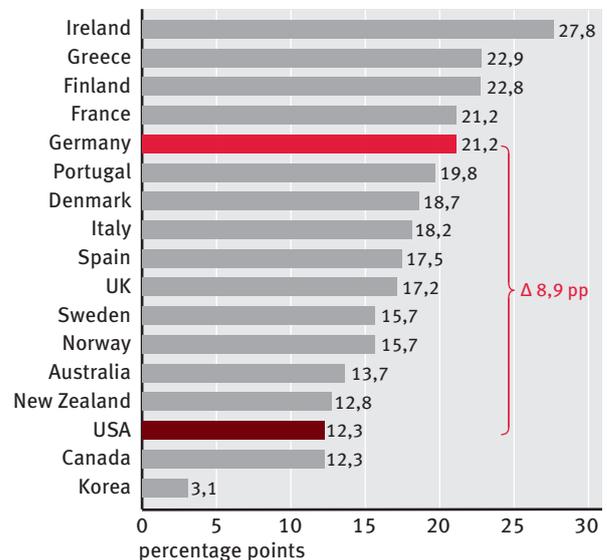
The majority of the studies reported rising income and wealth disparities in many countries, with the increase being most evident in Anglo-Saxon nations such as the United States and the United Kingdom. However, a rise in income and wealth disparity is also visible in Continental Europe (OECD 2011) for example in Germany (Anselmann and Krämer 2015) (cf. figure 2).



Source: OECD 2015. OECD Stat Extracts. Social Protection and Well-being. Data refer to annual real equivalised household income.

Fig. 2: Gini coefficient increases, 2000 – 2012

Although inequality has risen substantially in many continental European states, most of its economies are still characterized by a relatively equal income distribution compared to Anglo-Saxon countries like the US or the UK. This is due to substantial redistribution and due to their better-equipped social security systems (cf. figure 3).



Source: OECD 2015. OECD Stat Extracts. Social Protection and Well-being. Data refer to annual real equivalised household income.

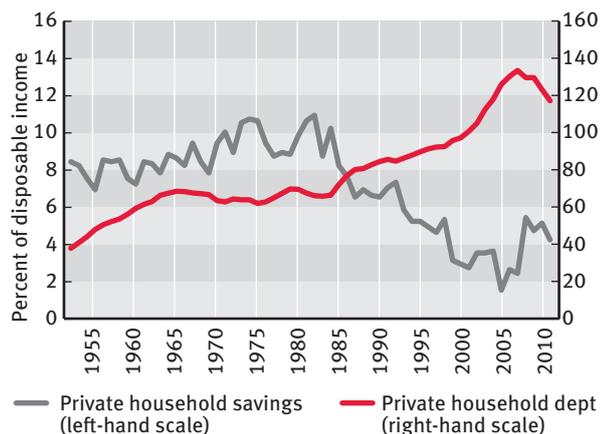
Fig. 3: Income redistribution: Difference Gini market income and Gini disposable income; ≈ 2012

It is well established that economies do not have to give up the principles of social welfare states in order to achieve a high degree of efficiency, measured for example in terms of unemployment and economic growth. On

the contrary, as recent research in this area has shown, high inequality may even cause economic growth to decrease (Ostry et al. 2014). A frequently cited example is Sweden that underwent drastic reforms in the late 1990's because of the deep economic crisis in the early 1990's. Among others, the reforms comprised a tax reform, deregulation of product and service markets, reforms of wage bargaining and general labor market reforms. Although these reforms were substantial, they left the basic principles of the Swedish social welfare state unchanged. Nowadays the two main characteristics of the Swedish economy are flexibility on markets, in particular the labor market, and social protection of individuals.

In order to understand the functioning of economic systems built on principles of flexicurity capitalism, the research project elaborated on the approach by Flaschel and Greiner (2012) to analyze the evolution of capitalism. We focused on current approaches to the study of macro-dynamical systems in the tradition of the classical, the neoclassical, and the Keynesian interpretation of how modern capitalist economies work. This helped to clarify the question of efficiency in terms of achieving low unemployment and sustainable economic growth.

As the comparison between the United States and Germany revealed, changes in income and wealth inequality can influence savings and consumption patterns in very heterogeneous ways. While economic growth in the United States was mainly based on strong domestic demand, which was increasingly due to credit-financed consumption expenditure (cf. figure 4), the main growth impulses in Germany came from the export sector.



Source: M. Setterfield et al., 2014.

Fig. 4: Private household savings and debt in the USA, 1952 – 2011

Today, years after the beginning of the financial crisis, both income and wealth inequality continue to rise in several nations, and economic recovery is still very modest in many countries. In light of these circum-

stances, the issue of secular stagnation has recently been revived. Since rising income and wealth disparity can be considered contributory causes of the Great Recession, the project also examined the important issue, of whether increasing inequality also determines long-term (secular) economic growth. Several economists have recently suggested that rising income and wealth differences could lead to a long phase of low growth. Among them are Summers (2014), Piketty (2014) and Gordon (2016). It is highly plausible that in the presence of emulation effects in consumption behavior and with fundamental uncertainty about the long-term consequences of debt accumulation, rising income inequality of the sort witnessed in the US since 1980 boosted growth but simultaneously undermined the sustainability of the growth process (Setterfield et al. 2014). Using plausible parameter values, it was shown that changes in the distribution of income similar to those witnessed in the US after 1980 raised the rate of growth but simultaneously rendered the growth regime unsustainable. Important insights in this regard could be gained by international comparison. It is well known that the epicenters of the recent crisis were the US and UK, two “liberal market economies” (Hall and Soskice, 2001), where neoliberalism was most advanced and where increases in income inequality have been most pronounced over the last thirty-five years. This suggests a link between increased income inequality and the eventual onset of the crisis brought about by a “hollowing out” of the growth process. The precise nature of this link was made clearer when events in a representative liberal market economy (such as the US) were compared and contrasted with those in a “coordinated market economy” (Hall and Soskice, 2001) such as Germany. The results achieved in this project shed light on the sustainability of growth in liberal and in coordinated market economies in the face of rising income inequality, an important aspect of comparative macroeconomic performance across different varieties of capitalism. These findings, together with several policy recommendations that were derived from detailed analysis of the findings, were presented and discussed in two international workshops at the New School for Social Research in New York City in November 2015 and at Bielefeld University in March 2016. Selected contributions of these workshops will be published in a conference volume.

Literature

[1] C. Anselmann, H. M. Krämer, *Income inequality and top incomes: some recent empirical developments with a focus on Germany*, International Review of Applied Economics, Vol. 29, No. 6, 2015, pp. 770-786.

- [2] P. Flaschel, A. Greiner, *Flexicurity Capitalism: Foundations, Problems and Perspectives*. Oxford University Press, New York, 2012.
- [3] R.J. Gordon, *The Rise and Fall of American Growth: The U.S. Standard of Living Since the Civil War*, Princeton, Princeton University Press, 2016.
- [4] P.A. Hall, D. Soskice, *Varieties of Capitalism: The Institutional Foundations of Comparative Advantage*, Oxford, Oxford University Press, 2001.
- [5] OECD, *Divided We Stand: Why Inequality Keeps Rising*, Paris, OECD Publishing, 2011.
- [6] J.D. Ostry, A. Berg, C.G. Tsangarides, *Redistribution, Inequality, and Growth*, IMF Staff Discussion Note 14/02, Washington, D.C., 2014.
- [7] T. Piketty, *Capital in the Twenty-First Century*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 2014.
- [8] M. Setterfield, Y.K. Kim, J. Rees, *Inequality, Debt Servicing, and the Sustainability of Steady State Growth*, New School for Social Research Working Paper 04/2014, New York, 2014.
- [9] J. E. Stiglitz, *The price of inequality: how today's divided society endangers our future*, Norton, New York, 2012.
- [10] L.H. Summers, *Reflections on the 'New Secular Stagnation Hypothesis'*, in: C. Teulings, R. Baldwin, *Secular Stagnation: Facts, Causes and Cures*, CEPR Press, 2014, pp. 27-38.
- [11] UNCDF (UN Capital Development Fund), *Inclusive Future: Inequality, Inclusive Growth and the post-2015 Development Framework*, United Nations, New York, 2013.
- [12] R. Wilkinson, K. Pickett, *The Spirit Level: Why Equality is Better for Everyone*, Penguin, London, 2010.

### Zusammenfassung

Ausgehend von der empirischen Beobachtung, dass reale Ökonomien effizient sein können ohne Sozialstaatsprinzipien aufzugeben, wie etwa einige nordeuropäische Länder, hat dieses Forschungsprojekt die Einkommens- und Vermögensverteilung in Deutschland und den USA evaluiert und theoretische Fundierungen entwickelt, die die wichtigsten stilisierten Fakten replizieren. Darüber hinaus wurde analysiert, wie die gegenwärtige Finanz- und Schuldenkrise die Ungleichheit in den beiden Ländern beeinflusst hat. Die theoretischen Modelle dienen als Basis, um Politikempfehlungen für inklusives Wachstum sowohl für Deutschland als auch für die Vereinigten Staaten abzuleiten.

### Abstract

Based on the empirical observation that real-world economies can perform efficiently without abandoning social principles, such as in some welfare states in Northern Europe, this research project evaluates the evolution of inequality in Germany and the United States and develops theoretical foundations that can replicate the most important stylized facts. In addition, the question of what role the recent financial and public debt crisis has played with respect to inequality in the two economies is analyzed. The theoretical models served as a basis for policy recommendations for inclusive growth both for Germany and for the United States.

### Author

**Prof. Dr. Hagen Krämer**

Professor at the Faculty of Management Science and Engineering at the Karlsruhe University of Applied Sciences

### Acknowledgement

Further members of the DFG-research project:

Christina Anselmann, M.Sc, Academic Assistant at the Karlsruhe University of Applied Sciences, Department of Management and Engineering  
Dr. Bettina Fincke, Assistant Professor, Bielefeld University

Prof. Dr. Alfred Greiner, Professor of Economics, Bielefeld University

Prof. Dr. Willi Semmler, Professor of Economics, The New School for Social Research, New York (NY)

Prof. Mark Setterfield, Ph.D., Professor of Economics, The New School for Social Research, New York (NY)

### Contact

Prof. Dr. Hagen Krämer

Karlsruhe University of Applied Sciences

Faculty of Management Science and Engineering

Moltkestr. 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: hagen.kraemer@hs-karlsruhe.de

# Eigenfertigung verschafft Gewinn- und Produktivitätspotenziale

Steffen Kinkel

Das Institut für Lernen und Innovation in Netzwerken (ILIN) an der Hochschule Karlsruhe und das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI führten gemeinsam die Studie „Wertschöpfung lohnt – Vorteile und Notwendigkeit lokaler Wertschöpfungsketten“ durch. Im Auftrag des damaligen Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg und des Instituts für Produktionserhaltung e. V. (Infpro) wurde untersucht, wie die Wertschöpfungsketten von deutschen und baden-württembergischen Unternehmen aufgebaut sind und welche Chancen und Risiken damit einhergehen.

### Eigene Wertschöpfung lohnt sich

Die Studienergebnisse zeigen eindeutig, dass sich der Auf- und Ausbau eigener Wertschöpfung bei Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes aus wirtschaftlichem Kalkül lohnt, und zwar in mehrfacher Hinsicht. So zeigt sich

ein signifikant positiver Einfluss der unternehmensinternen Wertschöpfungstiefe auf die Gewinnsituation eines Unternehmens. Dies belegt ein lineares Regressionsmodell auf Basis der Kostenstrukturdaten des Statistischen Bundesamts. Eine Erhöhung der Wertschöpfungstiefe eines Unternehmens um einen Prozentpunkt geht demnach mit einer Gewinnsteigerung um 0,2 Prozentpunkte einher. Zudem ist die Wertschöpfungstiefe der stärkste Erklärungsfaktor für die Gesamtfaktorproduktivität eines Unternehmens. Dies zeigt ein Regressionsmodell auf Basis der breitenempirischen Unternehmensbefragung „Modernisierung der Produktion“ des Fraunhofer ISI bei 1594 Betrieben des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland (s. Tab. 1). Auch die Exportquote weist einen positiven Effekt auf und ist nach der Wertschöpfungstiefe der zweitstärkste Erklärungsfaktor für die Produktivität von Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes.

Einflussfaktor	Indikator	Koeffizient	Signifikanz	Δ R2
Betriebsgröße	Logarithmus der Anzahl der Beschäftigten	0,077	0,028 **	0,005 **
Branche <sup>(1)</sup>	Nahrungs-, Genussmittel, Getränke, Tabak (10 12)	0,139	0,001 ***	0,031 ***
	Chemie (20 21)	0,099	0,007 **	0,031 ***
	Gummi- und Kunststoffwaren (22 23)	0,067	0,138	0,031 ***
	Metallindustrie (27 28)	-0,023	0,624	0,031 ***
	EDV, Elektronik, elektrische Ausrüstungen (26 27)	-0,045	0,270	0,031 ***
	Fahrzeugbau (29 30)	-0,006	0,852	0,031 ***
	Sonstiges	0,004	0,936	0,031 ***
Vorleistungen aus dem Ausland	Vorleistungen aus Ausland [%] (Z-Wert)	0,049	0,155	0,002 n.s.
Export	Export [%] (Z-Wert)	0,124	0,001 ***	0,011 ***
Fertigungstiefe	Fertigungstiefe [(Umsatz-Vorleistung)/Umsatz] (Z-Wert)	0,356	0,000 ***	0,115 ***
Komplexität <sup>(2)</sup>	einfache Produkte	0,045	0,199	0,002 n.s.
	komplexe Produkte	0,000	0,993	0,002 n.s.
Seriengröße <sup>(3)</sup>	Einzelstückfertigung	0,026	0,459	0,001 n.s.
	Großserienproduktion	0,031	0,361	0,001 n.s.
Region <sup>(4)</sup>	Baden-Württemberg <sup>(4)</sup>	-0,029	0,366	0,001 n.s.
Modelgüte	N	890		
	korr. R <sup>2</sup> / Sig.	0,137	0,000	

Anmerkungen: Abhängige Variable: ln von Gesamtfaktorproduktivität. Modellspezifikation: lineare Regression. Signifikanzniveau: \*\*\* p < 0.001, \*\* p < 0.05, \* p < 0.1, n.s. p > 0.1  
Referenzgruppen: (1) Maschinenbau (28), (2) Produkte mittlerer Komplexität, (3) Fertigung mittelgroßer Serien, (4) sonstige Bundesländer

Tab. 1: Lineares Regressionsmodell auf die Gesamtfaktorproduktivität der Betriebe

**Global Sourcing zeigt keine positiven Wirtschaftlichkeitseffekte**

Dagegen liefert der Auslandsbezug von Vorleistungen keinen signifikanten Erklärungsbeitrag für die Gewinnsituation oder Produktivität eines Unternehmens. Die Nutzung globaler Zulieferketten (global supply chains) scheint entgegen vielfach geäußelter Ansichten nicht entsprechend positiv mit der wirtschaftlichen Entwicklung eines Unternehmens zusammenzuhängen. Insbesondere Outsourcing-Aktivitäten zu ausländischen Zulieferern gilt es deshalb zunehmend kritisch zu hinterfragen.

Erklärungen hierfür liefern die ergänzenden qualitativen Ergebnisse von 16 Experteninterviews. Demnach werden die Kostenreduzierungs Potenziale bei Fremdbezug durch höhere Koordinationsaufwendungen kompensiert, um die flexible Reaktions- und Lieferfähigkeit in der Lieferkette abzusichern. Über die letzten Jahre ist zwar ein Zuwachs des Importanteils der Vorleistungen im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands zu verzeichnen, doch auch die Strategie des „local sourcing“ ist weiterhin fest verankert. Tendenziell werden niedrigere Preissegmente und große Losgrößen mit geringer Varianz in Fernost bezogen. Bei kleineren Stückzahlen und kundenspezifisch variierenden Anforderungen sind jedoch Lieferanten aus Asien meist nicht flexibel genug. Die Entfernung Asiens macht nachträgliche Änderungen an Produkten zusätzlich teuer und aufwendig. Hinzu kommen Preisanstiege bei chinesischen Lieferanten, insbesondere im östlichen Industriegürtel des Landes, die zwischenzeitlich durchaus spürbar sind. Auch der Lieferantenaufbau in China bzw. Fernost stellt sich aufwendiger dar als im lokalen oder europäischen Umfeld. Lieferantenprobleme in Fernost werden zumeist später erkannt und deren Behebung dauert länger. Jedoch wird der ostasiatische Raum weiterhin ein wichtiger Markt für den Vorleistungsbezug bleiben, allein schon wegen seiner weiterhin herausragenden Bedeutung als Absatzmarkt.

**Vier Wertschöpfungstypen**

Nach den Ergebnissen der Studie lassen sich die Unternehmen des deutschen Verarbeitenden Gewerbes hinsichtlich ihrer Wertschöpfungs- und Vorleistungsstrategien in vier Wertschöpfungstypen einordnen (Abb. 1): Der Typ 1, der „Local Sourcer“, umfasst jene Unternehmen, die eine unterdurchschnittliche Importquote von Vorleistungen und unterdurchschnittliche Wertschöpfungstiefe aufweisen. Der Typ 2, der „Global Sourcer“, kombiniert eine überdurchschnittliche Importquote von Vorleistungen mit einer unterdurchschnittlichen Wertschöpfungstiefe. Der Typ 3, der „Local Maker“, umfasst jene Unternehmen, die eine unterdurchschnittli-

che Importquote von Vorleistungen gepaart mit einer überdurchschnittlichen Wertschöpfungstiefe aufweisen. Unternehmen vom Typ 4, „Global Maker“, weisen schließlich bei beiden Faktoren eine überdurchschnittliche Ausprägung auf. Dabei gelingt es Unternehmen des Typs 3, „Local Maker“, erfolgreich, die Produktivitätsvorteile einer hohen eigenen Fertigungstiefe mit den Flexibilitätsvorteilen eines hohen Vorleistungsbezugs aus dem lokalen Umfeld zu verbinden. Zudem beschäftigen sie überdurchschnittlich viele Techniker, Handwerksmeister sowie Mitarbeiter in der Fertigung und Montage. Dieser Fokus auf qualifizierte Facharbeit scheint notwendig, um bei einer Wertschöpfungsstrategie, die vorrangig auf hohe Fertigungstiefe und geschlossene Wertschöpfungsketten setzt, nachhaltige Spezialisierungsvorteile generieren zu können. Baden-württembergische Unternehmen positionieren sich überdurchschnittlich häufig als „Local Maker“.



Abb. 1: Vier Betriebstypen zwischen eigener Wertschöpfung und ausländischem Vorleistungsbezug

**Baden-württembergische Unternehmen gut aufgestellt**

Die baden-württembergischen Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sind im Lichte der Studienergebnisse damit gut aufgestellt. Sie setzen auf eine im Vergleich zu Betrieben aus anderen Bundesländern überdurchschnittlich hohe Wertschöpfungstiefe und scheinen strategisch auf einen höheren Anteil von eigenen Kernkompetenzen an ihrer Gesamtleistung ausgerichtet zu sein. Die mittlere Wertschöpfungstiefe des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg lag im Jahr 2013 mit fast 39 Prozent signifikant über dem Durchschnitt des gesamten deutschen Verarbeitenden Gewerbes. Letztere ist von etwa 34 Prozent im Jahr 2000 auf etwa 30 Prozent im Jahr 2008 abge-

schmolzen. Danach hat sich die Wertschöpfungstiefe in Deutschland aber stabilisiert und moderat positiv weiterentwickelt, bis hin zu 33 Prozent im Jahr 2014. Dies könnte ein Beleg dafür sein, dass deutsche Unternehmen ihre eigene Produktionskompetenz wieder verstärkt als wertschaffende Fähigkeit begreifen.

### **Sicherung eigener Wertschöpfung im Bereich der Elektromobilität notwendig**

Die Studienergebnisse sind für die Wirtschaft auch deshalb relevant, da es in der deutschen und baden-württembergischen Automobilindustrie zukünftig aufgrund des Wandels zur Elektromobilität zu einer veränderten Wertschöpfungsstruktur kommen könnte. Zurzeit entfällt etwa ein Viertel der Wertschöpfung fossil betriebener Pkw auf die Antriebskomponenten. Gerade hier liegt eine Kernkompetenz deutscher Hersteller.

Zukünftig bestehen Potenziale in Deutschland und Baden-Württemberg insbesondere bei Elektromotoren, Leistungselektronik und Leichtbau, allerdings stehen dem Schwächen in Bereichen wie Traktionsbatterie und Brennstoffzelle gegenüber. So droht bei entsprechenden Mobilitätsszenarien, die von einer starken Entwicklung in Richtung Elektromobilität ausgehen, ein inländischer Wertschöpfungsverlust der deutschen Automobilhersteller in Höhe von 19 % im Vergleich zu einem konservativen Szenario. Dies entspräche nach den Erkenntnissen der Studie einem Gewinnreduktionspotenzial von 3,8 %. Vor diesem Hintergrund erscheint es notwendig, entsprechende Aktivitäten voranzutreiben, um zukünftig ausreichend eigene Wertschöpfung für die baden-württembergischen Automobilhersteller und -zulieferer im Zukunftsfeld Elektromobilität sicherstellen zu können.

#### **Abstract:**

A study for the Ministry of Finance and Economics in Baden-Wuerttemberg (2015) concludes that in-house manufacturing pays off and that outsourcing has different risks. A major result is the significantly positive impact of the companies' internal value added depth on their profit and productivity potential. Outsourcing activities to foreign suppliers are increasingly critical, due to the reduced flexibility in inter-country supply chains. Manufacturing companies in Baden-Wuerttemberg are already striving to achieve above-average levels of in-house value added, but they should also develop the technological fields of the future, such as e-mobility.

#### **Zusammenfassung:**

Eigenfertigung zahlt sich aus, Outsourcing birgt Risiken. Zu diesem Fazit kommt die Studie „Wertschöpfung lohnt – Vorteile und Notwendigkeit lokaler Wertschöpfungsketten“ im Auftrag des damaligen Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg. Ein wesentliches Ergebnis ist der signifikant positive Einfluss der unternehmensinternen Wertschöpfungstiefe auf die Gewinnsituation und Produktivität. Outsour-

cing-Aktivitäten zu ausländischen Zulieferern gilt es deshalb aufgrund der reduzierten Flexibilität in den länderübergreifenden Zulieferketten zunehmend kritisch zu hinterfragen. Gerade baden-württembergische Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes setzen bereits heute auf eine überdurchschnittlich hohe eigene Wertschöpfungstiefe, sollten diese aber für Zukunftsfelder wie etwa der Elektromobilität noch weiter ausbauen.

#### **Autor**

**Prof. Dr. Steffen Kinkel**

Professor an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der Hochschule Karlsruhe

#### **Kontakt**

Prof. Dr. Steffen Kinkel  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik  
Leiter des Instituts für Lernen und Innovation in Netzwerken (ILIN)  
Moltkestr. 30  
76133 Karlsruhe  
steffen.kinkel@hs-karlsruhe.de  
Telefon: 0721 925-2915

# Identification of Factors influencing the Acceptance of Wearables

Lena Gribel, Stefanie Regier and Ingo Stengel

## Motivation

As a consequence of the proliferation of computer-augmented everyday objects along with the ever-increasing miniaturization of microprocessors, the recent advances in information technologies has dramatically changed the manner in which people understand, experience and use IT. The convergence of variant Information and Communication Technologies (ICT) entails an on-going paradigm shift in the field of human computer-interaction, promising context-aware and seamlessly integrated on the fly computing across heterogeneous circumstances, irrespective of place and time. In this context, the wearable computing paradigm complements the concept of ubiquitous computing, since “wearables” allow continuous connectivity to the environment by equipping the user with computational capabilities. The vast economic potential of the respective socio-technological gadgets [1] is seen in the forecasts for wearable devices with a market value of \$12.6 billion by 2018. Nonetheless, the diffusion of wearable computing depends highly on a variety of factors, which are primarily technological or socio-psychological in nature. In view of the numerous efforts in the area of innovation, which have failed due to a lack of consumer acceptance, it is clear that facilitation of acceptability is a key issue for entrepreneurship. However, up to now, there has only been very little scientific research done on the acceptance of ubiquitous computing in general and, in particular, on the latent acceptance determinants of the wearable computing phenomenon. In addition, it is significant that personality variables in terms of character traits have seldom been examined within the scope of information systems research.

## Methodology

In view of the fact that attitude formation towards innovative technologies involves multiple interrelated cognitive and affective activities, it is surprising that almost all empirical studies on technology acceptance depend solely on quantitative methodologies. Moreover, academic research in the area of ubiquitous and wearable computing acceptance is still relatively scarce [2]. This makes an exploratory research study indispensable in order to motivate for research on the intrapersonal factors affecting the adoption of wearable technology. This qualitative study aimed to explore subjective beliefs and perceptions users have

towards wearable computing in order to establish a proper theoretical basis for the development of a coherent system of causal hypotheses. The resulting categories of beliefs towards wearable computing acceptance should constitute the main content of the Wearable Technology Acceptance Model (Wearable TAM) that can also be tested quantitatively.

The objective of the sample selection was to attain sufficient sample heterogeneity in terms of maximal diversity of knowledgeable interview participants. Therefore, sample units from industry and the educational sector with different perspectives on wearable computing, with different levels of personal experience, and with experience of different types of wearables - particularly in terms of smart watches and smart glasses - were selected. All interviewees were directly involved in diverse wearable computing issues and were thus expected to have a high level of affinity towards wearables and to provide elaborative beliefs and pre-existing assessments concerning the social and individual-level causal mechanisms and processes involved in the adoption of wearable technologies. Besides the criteria of theoretical purpose and theoretical relevance, the sampling procedure was not controlled by any further selection criteria such as gender, age or social status. The author simultaneously collected, coded and analysed the material, attempting to “saturate” the relevant concepts and categories. After interviewing seven subjects, the need for further interviews ceased since no further results were expected to contribute to the conceptual and theoretical understanding of the subject matter.

Following the inductive category development process described by Mayring [3], data analysis started with a material reduction of the transcribed versions of the audiotapes and field notes by discarding the chunks of data that did not directly relate to wearable technology usage. Thereafter, the process of data interpretation commenced by underlining the parts of the text relevant to wearable technology acceptance. Subsequently, in-vivo codes were constructed from each meaningful unit of analysis supported by the text. Afterwards, these codes were transferred into constructed codes in English, and were gradually abstracted into higher order concepts in the course of an iterative process of constant revision. In sum, 67 codes emerged from the analytical process.

To further conceptualise the properties of attitude formation in wearable technology markets, similar codes were aggregated into a coherent, overarching concept. Thus, more abstract, higher-level categories were developed, completely covering the implicit meaning of the respective code cluster. Particular emphasis was laid on defining exhaustive categories that were also mutually exclusive. The code clustering procedure was performed until all constructed codes were assigned to a higher-order category, reflecting a specific theoretical construct. In total, 13 theoretical constructs emerged from the qualitative research phase.

**Key Findings**

The results from the qualitative study provide manifold insights concerning the inter-individual adoption decision process in wearable technology markets. The strongest intrapersonal factor that is expected to support the acceptance of wearable computing is Perceived Usefulness, primarily attributed to work and learning support. Most respondents named hands-free instruction guidelines and real-time notifications as specific product features that they considered beneficial. Based on the interviews, the usefulness of wearables can mainly be ascribed to the unique attributes of the respective, newly emerged computing paradigm. These abstract attributes are subsumed under the concept of Pervasiveness, meaning that this innovative class of IT systems ought to provide / constant as well as context-aware information services and applications unobtrusively and to the greatest possible extent in order to generate substantial benefits. Moreover, from the results of the qualitative study it is apparent that the main reason for wearable computing resistance is concern about IT security. In particular, a majority of respondents reported that they feared privacy risks in view of the fact that

wearables would process highly sensitive personal data at an unprecedented rate. Furthermore, the interview analysis revealed that personality-related correlates of behaviour exert an important - albeit indirect - influence on wearable computing acceptance.

In order to develop an inter-individual path model of wearable technology acceptance the results from the study were finally compared with extant theoretical and conceptual models in literature. Overall, the sought Wearable TAM aims to clarify and holistically explain the correlating effects of the identified acceptance factors and the consumer's ?or/decision to adopt wearable technologies. Due to its efficiency as well as its dominant role within acceptance research, in the context of the present study the Technology Acceptance Model (TAM) by Davis [4] served as a behavioural source model for successively deriving the research hypotheses. This model is specially geared towards understanding acceptance behaviour in technology markets. It conceptualises the behavioural intention to use new technology as a direct consequence of the perceived usefulness and perceived ease of use as powerful and simultaneously??parsimonious does not make sense here. predictor variables.

Furthermore, prompted by contemporary research gaps as well as the results of the qualitative study, particular attention was paid to commensurable theories in the area of IT security and personality psychology for gradually augmenting the TAM with further explanatory variables. More precisely, the well-accepted Five Factor Model (FFM) of personality [5] in (conjecture means 'a guess' or inferring) combination with the so-called 3M model by Mowen [6] were employed for the purpose of the present study, resulting in a hierarchically ordered

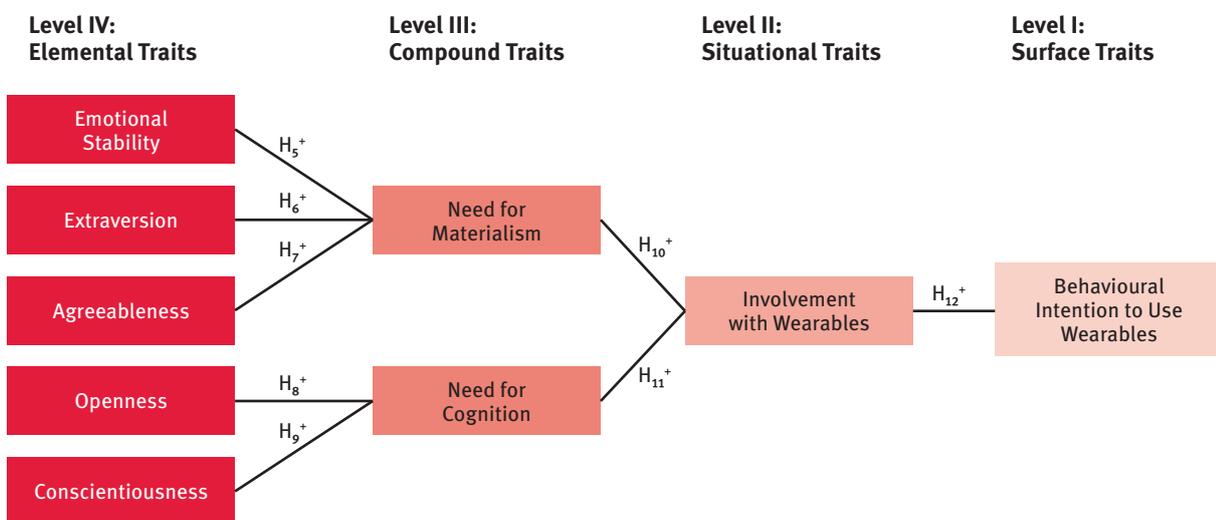


Fig. 1: Implemented structure of personality-related latent variables

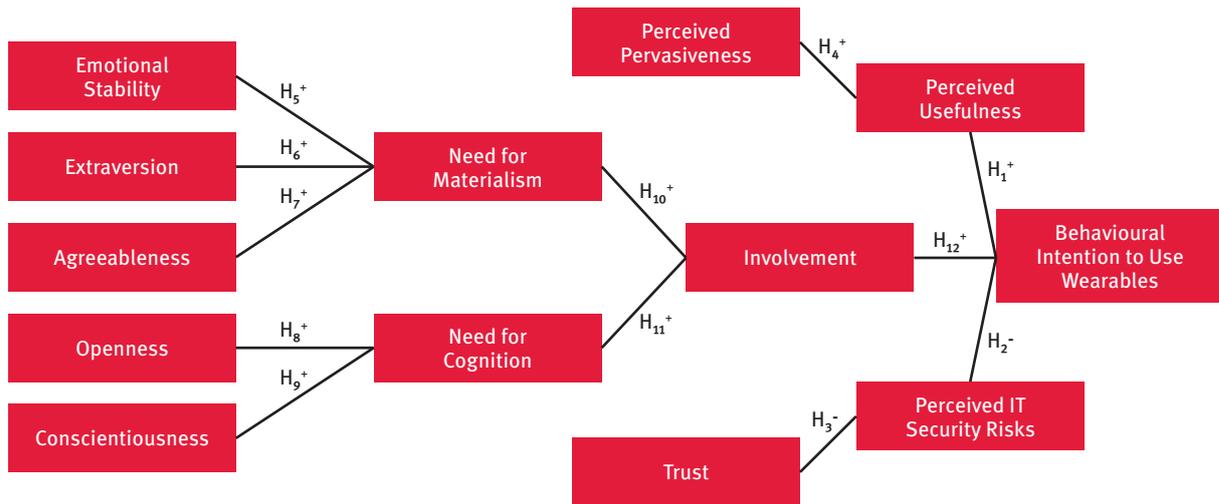


Fig. 2: Overall system of hypotheses of the Wearable Technology Acceptance Model

structure of personality-related correlates of behaviour (see Fig. 1). Besides, the subjectively perceived degree of IT security was modelled in terms of a multidimensional construct by focussing on the classical CIA triad (Confidentiality, Integrity, and Availability) in security literature [7] to be capable of fully evaluating the singular effect of each dimension on consumers' perceptions of security. Consequently, drawing on the results of both the qualitative expert interviews and the findings of prior research, the causal Wearable TAM depicted in Fig. 2 could be systematically deduced in a theory-driven manner.

### Conclusions

Overall, the implications of the exploratory study are substantial since they deliver unique insights from a qualitative perspective. These inductive findings not only provide single belief sets, but also a holistic perspective on acceptance behaviour in innovative IT markets. The empirical results from the expert interviews contribute to information systems research by revealing the substantial role of personality traits on consumer willingness to adopt wearable computing. However, it has to be noted that the results are not readily generalizable to the broad consumer market, as they are based on a theoretical sample. Rather, they form the basis for a future quantitative study to validate the hypothesised Wearable TAM.

### Literature

- [1] Statista 2014, *Wearable device market value from 2010 to 2018*, Statista Inc., 2012. [Online]. Available: <http://www.statista.com/statistics/259372/wearable-device-market-value/>.
- [2] D. H. Shin, *Ubiquitous computing acceptance model: end user concern about security, privacy and risk*, International Journal of Mobile Communications, vol. 8, no. 2, 2010.
- [3] P. Mayring, *Qualitative Content Analysis: Theoretical Background and Procedures*, in Approaches to Qualitative Research in Mathematics Education, Springer, 2015.
- [4] F. D. Davis, *A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-user*, Wayne State University, Massachusetts, 1985.
- [5] R. R. McCrae and P. T. Costa, *Personality trait structure as a human universal*, American psychologist, vol. 52, no. 5, 1997.
- [6] J. C. Mowen, *The 3M Model of Motivation and Personality: Theory and Empirical Applications to Consumer Behavior*, Springer, 1999.
- [7] E. Hartono, C. W. Holsapple, K.-Y. Kim, K.-S. Na and J. T. Simpson, *Measuring perceived security in B2C electronic commerce website usage: A respecification and validation*, Decision Support Systems, vol. 62, 2014.

**Zusammenfassung**

Obschon Wearable Technologies ein erhebliches ökonomisches Potenzial bergen, herrscht bis heute ein theoretisches sowie empirisches Forschungsdefizit im Hinblick auf die Akzeptanzdeterminanten des Phänomens Wearable Computing. Ziel des vorliegenden Berichts ist daher die Identifikation und Konzeptualisierung verhaltensrelevanter Faktoren, die zur Adoption oder Ablehnung von Wearables führen. Dieser Artikel diskutiert ein Kausalmodell zur Erklärung der Adoption von Wearables, das auf Basis einer explorativen Studie und einer anschließenden qualitativen Inhaltsanalyse hergeleitet wurde.

**Abstract**

Despite the vast economic potential of wearable technologies, to date there has only been very little theoretical and empirical research carried out on the acceptance determinants of the wearable computing phenomenon. Therefore, the overall aim of this study is to identify and conceptualise behaviourally relevant factors that lead either to acceptance or to resistance towards wearable computing. This article synthesises a cause and effect model in order to explain wearable comput-

ing adoption Based on an exploratory study and a subsequent qualitative content analysis a conceptual framework is proposed.

**Authors**

**Lena Gribel M.Sc.**

Academic Assistant at the Faculty of Computer Science and Business Information Systems at Karlsruhe University of Applied Sciences

**Prof. Dr. rer. pol. Stefanie Regier**

Professor at the Faculty of Computer Science and Business Information Systems at Karlsruhe University of Applied Sciences

**Prof. Dr. Ingo Stengel**

Professor at the Faculty of Computer Science and Business Information Systems at Karlsruhe University of Applied Sciences

**Contact**

Lena Gribel M.Sc.

Karlsruhe University of Applied Sciences

Faculty of Computer Science and Business Information Systems

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [lena.gribel@hs-karlsruhe.de](mailto:lena.gribel@hs-karlsruhe.de)

**LERNEN SIE UNS KENNEN | WIR VISUALISIEREN IHR KNOW HOW | DRUCKERZEUGNISSE VON A - Z**

# HIER DRUCKEN

**VMK**  *Druckerei GmbH*

VMK Druckerei GmbH  
Faberstrasse 17  
67590 Monsheim  
Tel. 0049.6243.909.110  
Fax 0049.6243.909.100  
[info@vmk-druckerei.de](mailto:info@vmk-druckerei.de)  
[www.vmk-druckerei.de](http://www.vmk-druckerei.de)

# Nanostrukturierte, funktionelle Membranen zur Wasserreinigung

Ephraim Gukelberger, Stefan Schmidt und Jan Hoinkis

## Einleitung

Die Ressource Wasser ist elementare Grundlage des Lebens. Der steigende Wasserverbrauch aufgrund des anhaltenden Bevölkerungswachstums, der Intensivierung von Industrie- und Landwirtschaft sowie des Klimawandels machen weltweit eine nachhaltige Wasserwirtschaft notwendig. Eine besondere Herausforderung kommt in diesem Zusammenhang dem Wasserrecycling von Industrieabwässern und damit der Membrantechnik zu, insbesondere Kombinationen biologischer Abwasserreinigung und Membrantechnik in sogenannten Membranbioreaktoren (MBR), die sich gegenüber konventionellen biologischen Abwasserreinigungsanlagen durch eine höhere Wasserqualität und aufgrund sehr kompakter Bauweise durch einen geringeren Platzbedarf auszeichnen.[1] Membranbioreaktoren finden zum Beispiel Anwendung in der Textil- und Olivenölindustrie.

Das größte Problem solcher Anlagen liegt in der zeitabhängigen Abnahme der Durchlässigkeit, dem sogenannten Flux, der Membran. Das Anlagern von Bakterien und festen Partikeln an die Membranoberfläche bzw. in die Membranporen hinein verursacht das sogenannte Fouling oder Biofouling. Je mehr sich die Membran zusetzt, desto geringer wird deren Flux. Nach dem Überschreiten des sogenannten kritischen Flux muss die Membran chemisch oder physikalisch gereinigt werden. Aufgrund des erhöhten Reinigungsaufwands wird das Membranmodul allerdings häufig ausgetauscht. Als Folge steigen die Betriebskosten stark an.

Die Reduzierung des Fouling und damit die Erhöhung des Membrandurchflusses ist daher wesentlicher Bestandteil in der Forschung der Membrantechnik. Der Bereich Umwelttechnik des Instituts für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik der Hochschule Karlsruhe kooperiert auf diesem Gebiet mit dem Institut für Membrantechnologie (ITM-CNR, Italien) sowie der Universität Kalabrien (UNICAL, Italien). Eine innovative Membranbeschichtung verbessert die Fouling-Eigenschaften kommerzieller Membranen wesentlich.

## Membranbeschichtung

Das hier durchgeführte Verfahren besteht in der Beschichtung kommerzieller Ultrafiltrationsmembranen aus Polyethersulfon (PES) mittels einer copolymeri-

sierbaren bikontinuierlichen Mikroemulsion (PBM), die zu einer erheblichen Verbesserung der Membraneigenschaften führt. Mikroemulsionen unterscheiden sich von den klassischen Emulsionen durch ihre thermodynamische Stabilität und geringe Tröpfchengröße zwischen 10 und 200 nm und erscheinen deshalb transparent. Die Öl-Phase der hier verwendeten PBM besteht aus Methylmethacrylat (MMA), destilliertem Wasser und verschiedenen Tensiden: zum einen 2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) zur Herabsetzung der Oberflächenspannung der Öltröpfchen und deren Stabilisierung innerhalb der Emulsion [2], zum anderen das für die Copolymerisation mit dem MMA entscheidende Tensid Acryloyloxyundecyltriethylammoniumbromid (AUTEAB), welches ebenfalls zur Stabilisierung der PBM beiträgt (s. Abb. 1).

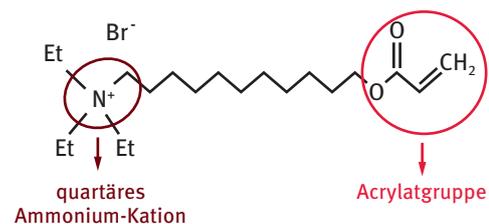


Abb. 1: Das Tensid AUTEAB

Dieses Tensid besteht aus einer Undecyl-, d.h. einer C<sub>11</sub>-n-Alkylkette, die an einer Seite mit einem quartären Triethylammonium-Kation und auf der anderen Seite mit der Acrylatgruppe abschließt. Die radikalische Copolymerisation zwischen dem MMA (Monomer 1) und dem AUTEAB (Monomer 2) erfolgt über die Doppelbindungen der Ethenylgruppen, die Bestandteil der Acrylatgruppen sind. Als zusätzliches Vernetzungsmittel (Crosslinker; Monomer 3) des entstehenden Copolymerisats dient Ethylenglycoldimethylacrylat (EGDMA). Dieses Copolymerisat-Netz beschichtet in statu nascendi die ursprüngliche hochporige Oberfläche der PES-Membran. Als Folge der Beschichtung sinkt die Oberflächenrauheit signifikant, der Porendurchmesser nimmt ab und somit auch die Trenngrenze.[3] Es entsteht eine fest verbundene Polymer-Matrix!

Das quartäre Triethylammonium-Kation erhöht die antimikrobiellen Eigenschaften der Membranoberfläche. Auch die Länge des AUTEAB-Moleküls hat eine positive Wirkung auf die antimikrobiellen Eigenschaften.

Der radikalische Copolymerisationsprozess der Beschichtung wird durch UV-Licht initiiert, dessen Abbruchreaktion erst nach der Gesamtumsetzung des Beschichtungsmaterials erfolgt. Zu Beginn der Experimente wurde die Copolymerisation und damit die Beschichtung noch mittels eines Redox-Initiators und einer UV-Quecksilberlampe gestartet. Dies stellte sich jedoch als äußerst langsame und schwer reproduzierbare Methode heraus. Daher wurde im nächsten Schritt die Copolymerisation mittels einer UV-LED-Lampe (Wellenlänge 360 – 405 nm) unter Verwendung eines Photoinitiators durchgeführt, was eine Aushärtung innerhalb weniger Sekunden ermöglichte. Weitere Vorteile dieser Methode sind der geringere Energieverbrauch aufgrund geringerer Temperaturen und damit geringerer Abwärme, die höhere Lebensdauer der UV-LED-Lampe, eine einfachere Regelbarkeit und die höhere Umweltverträglichkeit bei der Herstellung sowie Entsorgung, da kein Quecksilber anfällt. Die technische Herausforderung lag in der Optimierung von Bestrahlungsstärke, Bestrahlungszeit, Temperatur, Initiator-Konzentration und Initiator-Typ für das jeweilige Membranmaterial. Sämtliche Parameter wurden sowohl unter inerter Stickstoff-Atmosphäre (Sauerstoffanteil < 1%) als auch unter atmosphärischen Bedingungen untersucht.

### Oberflächenuntersuchungen

Zur Beurteilung der erzielten Qualität der Membranbeschichtung wurden unter anderem Rasterkraftmikroskope eingesetzt. Die Topologie wurde abgetastet und dreidimensional aufgelöst, sodass Aussagen über die Rauheit getroffen werden konnten (s. Abb. 2). Im direkten Vergleich ist die Oberfläche einer kommerziellen unbeschichteten PES-Membran (links), sowie einer PBM-beschichteten Membran gezeigt. Durch die Beschichtung ist eine erhebliche Glättung der Oberfläche zu erkennen. Untersuchungen zeigten, dass die Mem-

branrauheit um bis zu 58% gesenkt werden konnte. Je glatter die Oberfläche desto geringer ist die potenzielle Anlagerung von Bakterien und Mikroorganismen. [3] Versuche im Labormaßstab sowie im kleinen Anlagenmaßstab (0,33 m<sup>2</sup>) bestätigten die Verbesserung der Fouling- und Biofouling-Eigenschaften. Trotz stark verschmutztem Modellabwasser wurde der Nennwasserdurchfluss über mehrere Tage hinweg erreicht.

Mikrobielle Untersuchungen zum Entwicklungspotenzial gramnegativer und grampositiver Bakterien auf der jeweiligen Oberfläche bestätigten diese Ergebnisse zusätzlich. Beim Einsatz der PBM-Beschichtung konnte kein Bakterienbewuchs festgestellt werden. Die antimikrobiellen Eigenschaften sind somit eindeutig nachgewiesen. Die Untersuchung der Foulingeigenschaften, die mit Modellstoffen (z.B. Huminsäuren) in einer Laboranlage durchgeführt wurden, zeigten visuell eine geringere Fouling-Neigung (s. Abb.3).



Abb. 3: Aufnahme nach einer Versuchsreihe mit einer Modell-Fouling-Substanz (Huminsäure): ohne PBM-Beschichtung (oben), mit PBM-Beschichtung (unten) (Foto: Stefan Schmidt)

Kontaktwinkelmessungen mittels Tropfenkonturanalyse geben Aufschluss über die hydrophilen bzw. hydrophoben Eigenschaften von Membranen. Hydrophilere

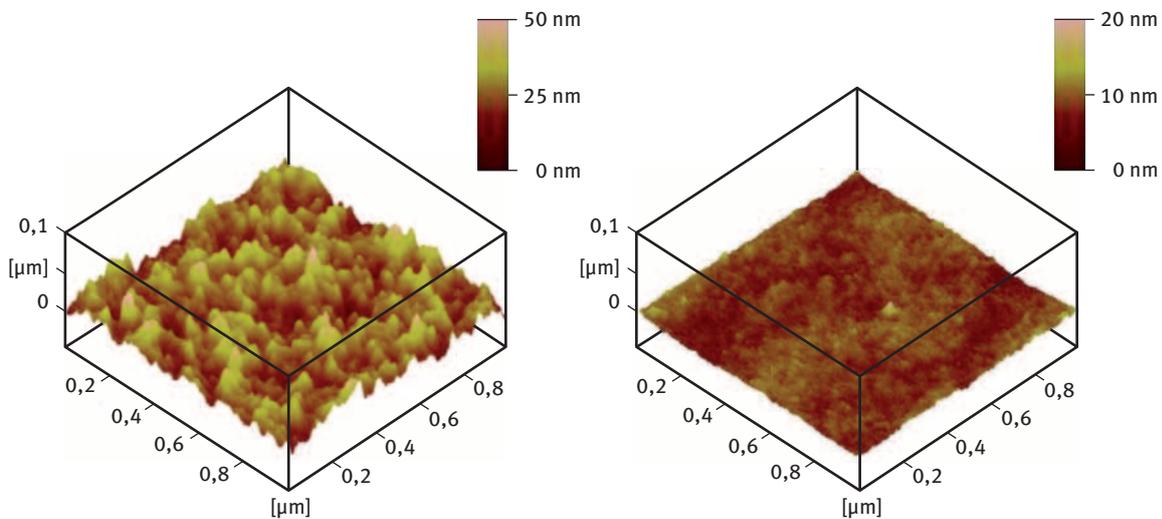


Abb. 2: Untersuchung der Membrantopologie ohne (links) und mit PBM-Beschichtung (rechts); Rasterkraftmikroskop

Membranen weisen dabei einen kleineren Kontaktwinkel auf und sind weniger anfällig für das Fouling mit den typischerweise hydrophoben Inhaltsstoffen im Abwasser. Aufgrund der Forderung nach möglichst günstigen Membranen zur Reduktion der Investitions- und Betriebskosten müssen auch die Kosten für die verwendeten Chemikalien gering gehalten werden. Deshalb ist ein möglichst hoher Polymerisationsgrad des Beschichtungsmaterials erforderlich. Der Umsatzgrad der Polymerisation wird durch ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer ermittelt. Während der letzten Jahre konnte die Hochschule Karlsruhe innerhalb verschiedener Forschungsprojekte die verbesserten Anti-Fouling-Eigenschaften von PBM-Membranbeschichtungen nachweisen. Allerdings ergibt sich durch die zusätzliche Schicht auf der Polyethersulfon-Membran ein zusätzlicher Widerstand für den Wasserdurchfluss bzw. eine verkleinerte Porengröße. Durch diesen Umstand sinkt die Permeabilität gegenüber der unbeschichteten Variante bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen. Dieses Verhalten wird momentan in weiteren Untersuchungen studiert, auch bezüglich des kritischen Flux.

#### Ausblick

Die kommenden Forschungsaktivitäten werden sich zum einen auf die Verringerung der Beschichtungsdicke zur Reduzierung des Membranwiderstands konzentrieren als auch auf die Anpassung der Betriebsparameter während der chemischen Synthese des Tensids AUTEAB sowie des UV-Beschichtungsprozesses. Das derzeitige Verfahren lässt noch keine kommerzielle Herstellung im großen Maßstab zu, allerdings wird bereits eine sehr gute Reproduzierbarkeit erzielt. In dem aktuellen EU-Forschungsprojekt VicInAqua ([www.vicinaqua.eu](http://www.vicinaqua.eu)) wird an einer Herstellung von mehreren Quadratmetern Membranbeschichtungsfläche gearbeitet, die dann in einer Großversuchsanlage in Kenia, am Viktoriasee, zur Abwasseraufbereitung von Fischfabriken sowie von kommunalen Abwässern genutzt werden soll.

#### Referenzen

- [1] S. Judd, *The MBR Book: Principles and Applications in Water and Wastewater Treatment*, 2<sup>nd</sup> edition, ISBN: 978-0-08-096682-3, 2010.
- [2] R. Leung, D. O. Shah, *Solubilization and phase equilibria of water-in-oil microemulsions*, Journal of Colloid and Interface Science, 1987, pp. 330–344.
- [3] F. Galiano, A. Figoli, S. A. Deowan, D. Johnson, S. A. Altinkaya, L. Veltri, G. De Luca, R. Mancuso, N. Hilal, B. Gabriele, J. Hoinkis, *A step forward to a more efficient wastewater treatment by membrane*, Journal of Membrane Science, 2015.

#### Abstract

Clogging and cake layer formation is the most challenging factor in membrane technologies. A further step towards prolonging the life span of membranes is an innovative coating using polymerisable, bicontinuous Microemulsion (PBM) techniques. This coating improves the hydrophilic membrane properties and reduces the ability of microorganisms as well as solid particles to adhere to the membrane. This is attributed to the smoother surface (lower surface roughness) and the functional groups in the polymer matrix after the polymerization process. Therefore, the newly developed membranes promise a new approach to recycling highly polluted wastewater.

#### Zusammenfassung

Das Zusetzen (sog. Fouling bzw. Biofouling) stellt in der Membrantechnik die größte Herausforderung dar. Eine Maßnahme zur Erhöhung der Standzeiten ist die innovative Beschichtung konventioneller Membranen mit einer polymerisierbaren bikontinuierlichen Mikroemulsion (PBM). Dadurch werden zum einen die hydrophilen Eigenschaften des Materials verbessert, als auch die Anhaftung von Verunreinigungen und der Bewuchs durch Mikroorganismen stark eingeschränkt. Dies ist auf eine glattere Oberfläche (verringerte Oberflächenrauheit) und auf die in der Polymermatrix enthaltenen funktionellen Gruppen zurückzuführen. Dadurch sind die neu entwickelten Membranen für stark belastete Abwässer prädestiniert.

#### Autoren

**Ephraim Gukelberger M.Sc.**

**Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schmidt**

Akademische Mitarbeiter am Institut für Angewandte Forschung der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr. Jan Hoinkis**

Professor an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik und Geschäftsführender Direktor des Instituts für Angewandte Forschung

#### Kontakt

Prof. Dr. Jan Hoinkis

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Moltkestraße. 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [jan.hoinkis@hs-karlsruhe.de](mailto:jan.hoinkis@hs-karlsruhe.de)

Telefon: +49 (0) 721 925-2359

# Kalibrierung einer plenoptischen Kamera zur Navigation und 3D-Datenerfassung

Niclas Zeller und Franz Quint

## Einleitung

Anders als herkömmliche Kameras nehmen plenoptische Kameras nicht nur eine zweidimensionale Abbildung einer Szene auf, sondern erfassen eine vierdimensionale Darstellung des Lichtfelds einer Szene. In diesem 4D-Lichtfeld wird für jeden Objektpunkt nicht nur ein Lichtstrahl (Pixel), sondern es werden mehrere Lichtstrahlen erfasst, die sowohl durch ihre Position auf einer Ebene (z.B. Sensorebene) als auch durch ihren Einfallswinkel auf dieser Ebene definiert sind. Durch das Erfassen mehrerer Lichtstrahlen, die von demselben Objektpunkt emittiert werden, ist es möglich, anhand des 4D-Lichtfelds die Tiefe der Objektpunkte in der aufgenommenen Szene zu bestimmen. Aufgrund ihrer kleinen Abmessungen, welche vergleichbar mit denen einer herkömmlichen Kamera sind und der zusätzlichen Fähigkeit, Tiefeninformationen zu erfassen, eignen sich plenoptische Kameras sehr gut für Navigationsanwendungen. In sogenannten „Simultaneous Localization and Mapping“ (SLAM) Algorithmen wird beispielsweise schrittweise die Position der bewegten Kamera bestimmt sowie eine dreidimensionale Karte der Umgebung erstellt. Um eine plenoptische Kamera in SLAM-Anwendungen einsetzen zu können, ist eine Kalibrierung der Kamera notwendig. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen 3D-Objektpunkten im Raum und den dazugehörigen Punkten im Bild hergestellt. Im Folgenden wird zunächst das Prinzip der plenoptischen Kamera vorgestellt. Anschließend definieren wir ein mathematisches Modell, das den Abbildungsprozess

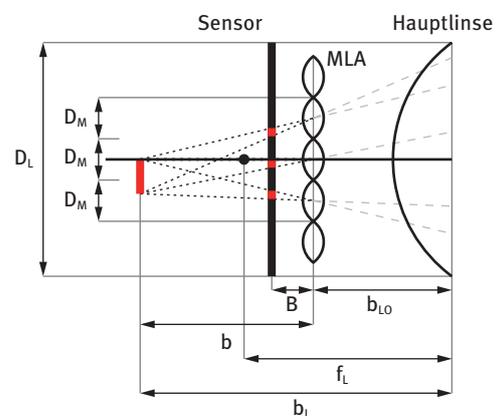
einer plenoptischen Kamera beschreibt. Die Parameter dieses Modells werden anschließend in einem Kalibrierprozess bestimmt. Schließlich wird ein kurzer Einblick in plenoptische SLAM-Verfahren gegeben.

## Die fokussierte plenoptische Kamera

Das Prinzip plenoptischer Kameras wurde bereits vor über hundert Jahren beschrieben [1], zu Messaufgaben wird sie jedoch erst seit kurzem eingesetzt. [2, 3] Im Vergleich zu einer herkömmlichen Kamera unterscheidet sich eine plenoptische Kamera durch ein Mikrolinsengitter (Micro Lens Array (MLA)), das dicht vor dem Sensor (im Abstand  $B$ , siehe Abb. 1(b)) platziert ist. Derzeit existieren im Wesentlichen zwei Konzepte von plenoptischen Kameras: die nichtfokussierte plenoptische Kamera (plenoptische Kamera 1.o) [2] und die fokussierte plenoptische Kamera (plenoptische Kamera 2.o) [3], welche im Folgenden beschrieben wird. Bei einer fokussierten plenoptischen Kamera wird der Sensor, anders als bei einer herkömmlichen Kamera, nicht in die Bildebene der Hauptlinse, sondern entweder vor oder hinter dieser platziert. Erst durch das MLA entstehen mehrere fokussierte Mikrobilder auf dem Sensor, die jeweils Ausschnitte der Hauptlinsenabbildung enthalten. Hierbei wird derselbe Objektpunkt in mehreren Mikrobildern abgebildet. Da die Hauptlinsenabbildung für den Fall, dass der Sensor vor dieser platziert ist, nicht mehr reell existiert (siehe Abb. 1(b)), wird diese im Folgenden als virtuelle Abbildung bezeichnet.



(a)



(b)

Abb. 1: (a) Plenoptische Kamera der Firma Raytrix GmbH (Modell R5); (b) Strahlengang im Inneren einer fokussierten plenoptischen Kamera

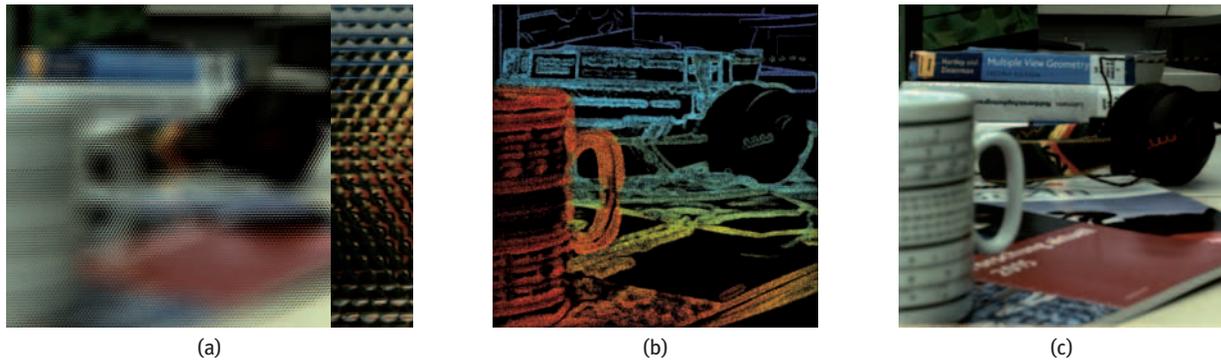


Abb. 2: (a) vom Sensor aufgenommene Mikrobilder und vergrößerter Bildausschnitt; (b) berechnete virtuelle Tiefenkarte: schwarze Regionen enthalten keine Tiefeninformation; (c) totalfokussiertes Bild; (Fotos: Niclas Zeller)

Aufgrund der redundanten Abbildungen in den Mikrobildern ist es möglich, korrespondierende Bildpunkte in diesen zu finden und somit durch Triangulation den zugehörigen relativen Abstand  $v$  (virtuelle Tiefe) zwischen MLA und virtueller Abbildung zu bestimmen ( $v = b/B$ ). Korrespondierende Punkte können nur für kontrastreiche Regionen der Szene gefunden werden, weshalb auch nur für diese Tiefeninformation erlangt wird (s. Abb. 2(b)).[4] Zusätzlich zur virtuellen Tiefenkarte kann ein sogenanntes totalfokussiertes Bild der virtuellen Abbildung berechnet werden (s. Abb. 2(c)).

#### Kalibrierung einer plenoptischen Kamera

Um eine beliebige Kamera für Messanwendungen (wie beispielsweise SLAM) verwenden zu können, ist eine mathematische Beschreibung des Kameramodells sowie die Bestimmung der Modellparameter in einem Kalibrierprozess notwendig. In der hier beschriebenen Arbeit wird ein Kameramodell für fokussierte plenoptische Kameras definiert und dieses anhand eines genauen Kalibrierverfahrens, basierend auf einem dreidimensionalen Referenzkörper, bestimmt.[5] Das hier beschriebene Kameramodell beschreibt die mathematische Abbildung eines 3D-Punkts im Objektraum auf den zugehörigen 3D-Punkt in der virtuellen Abbildung. Dieses Modell vereinfacht den Kalibrierprozess, da Referenzpunkte in der virtuellen Abbildung wesentlich einfacher und genauer bestimmt werden können als in den Mikrobildern auf dem Sensor. Darüber hinaus ist eine Rekonstruktion der virtuellen Abbildung (virtuelle Tiefenkarte plus totalfokussiertes Bild) auch ohne metrische Kalibrierung möglich. Zur mathematischen Beschreibung der Projektion eines 3D-Objektpunkts in den zugehörigen virtuellen 3D-Bildpunkt sind im Wesentlichen zwei Schritte notwendig: Zunächst wird der in festen Weltkoordinaten definierte Objektpunkt in ein auf die Position der Kamera bezogenes Kamerakoordinatensystem transformiert. Anschließend kann dieser Punkt anhand des Kameramodells in die virtuelle Abbildung projiziert werden. Die Projektion von Welt-

Kamerakoordinaten wird durch eine euklidische Transformation beschrieben. Hierbei bleiben Winkel sowie Strecken im Raum erhalten:

$$\mathbf{X}_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{X}_w$$

Die euklidische Transformation ist eine Transformation mit sechs Freiheitsgraden (Rotation und Translation in allen drei Dimensionen). Die Projektion von einem Objektpunkt in 3D-Kamerakoordinaten in den zugehörigen virtuellen Bildpunkt ist im Prinzip durch die Abbildung von dünnen Linsen definiert und kann durch die folgende Matrixmultiplikation beschrieben werden:

$$\lambda \cdot \mathbf{X}_v = \mathbf{K} \cdot \mathbf{X}_c$$

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix}$$

Hierbei ist sowohl der Bildabstand (Abstand zwischen Hauptlinse und virtueller Abbildung), als auch der Abstand zwischen MLA und virtueller Abbildung über die Abbildungsgleichung für dünne Linsen wie folgt beschrieben:

$$b_L = \left( \frac{1}{f_L} - \frac{1}{z_c} \right)^{-1} = B \cdot v + b_{L0}$$

$$b = b_L - b_{L0} = B \cdot v$$

Die vorangegangenen Gleichungen zeigen, dass die Koeffizienten der Matrix  $\mathbf{K}$  ( $b$  und  $b_L$ ) nichtlinear vom Objektabstand  $z_c$  abhängen und somit für jeden Objektpunkt neu berechnet werden müssen. Anhand der Pixelgröße ( $s_x$  und  $s_y$ ) und des Bildhauptpunkts ( $c_x$  und  $c_y$ ) sowie dem Abstand  $B$  zwischen MLA und Sensor lassen sich die metrischen Koordinaten  $\mathbf{X}_v$  in Pixelkoordinaten bzw. virtuelle Tiefe  $v$  umrechnen.

Das hier beschriebene Modell einer plenoptischen Kamera besteht somit aus fünf unbekanntem Parametern ( $f_L$ ,  $B$ ,  $b_{LO}$ ,  $c_x$  und  $c_y$ ) welche es zu bestimmen gilt. Die Pixelgröße kann in der Regel aus dem Datenblatt der Kamera entnommen und muss somit nicht mitbestimmt werden. Zusätzlich zum idealen Kameramodell werden Verzeichnungsparameter in allen drei Dimensionen definiert, welche die nichtidealen Eigenschaften des realen Hauptlinsensystems gegenüber einer idealen Linse korrigieren.

Zur Bestimmung der Modellparameter wird ein 3D-Kalibrierobjekt, das mit maschinell detektierbaren Marken versehen ist, aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen (s. Abb. 3). Anschließend werden anhand der Aufnahmen die optimalen Kameraparameter bestimmt. Da die Weltkoordinaten der Objektpunkte sowie die Kamerapositionen der einzelnen Aufnahmen zunächst nicht bekannt, für die Projektion aber erforderlich sind, müssen diese ebenfalls mitbestimmt werden.

### Kalibrierergebnisse

Zur Evaluierung des Kameramodells sowie zur Bestimmung der Messgenauigkeit einer plenoptischen Kamera wurden mehrere Kamerakalibrierungen mit einer Raytrix R5 Kamera durchgeführt. Hierfür wurden drei Objektive mit jeweils unterschiedlichen Brennweiten verwendet ( $f_L = 12,5$  mm,  $f_L = 16$  mm und  $f_L = 35$  mm). Tabelle 1 zeigt die geschätzte Brennweite  $f_L$  der Hauptlinse, den Abstand  $b_{LO}$  zwischen MLA und Hauptlinse sowie den Abstand  $B$  zwischen MLA und Sensor für die drei unterschiedlichen Objektive, welche aus der in Abschnitt 3 beschriebenen Kalibrierung resultieren.

Während der wahre Wert für  $b_{LO}$  nicht direkt messbar ist, erhält man für die Brennweite  $f_L$  mit dem Nominalwert eine sehr gute Referenz. Hierbei liegt die Differenz zwischen Schätz- und Nominalwert jeweils unter zwei Prozent und somit innerhalb der Fertigungstoleranzen der Objektive. Des Weiteren liegen die Abstände  $B$  für alle drei Messungen sehr nahe beieinander. Dies war zu erwarten, da es sich hierbei um eine Konstante des Sensors handelt, welche unabhängig vom Objektiv ist. Für alle drei Kalibrierungen wurden Rückprojektionsfehler kleiner 0,1 Pixel erreicht, was die Gültigkeit des Kameramodells bestätigt.

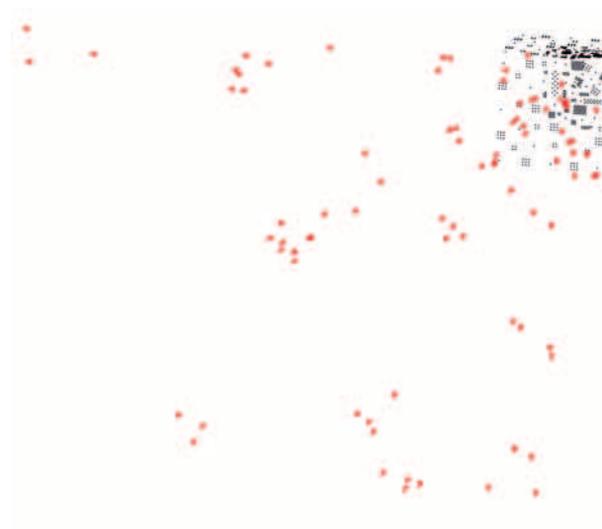
	Objektiv 1	Objektiv 2	Objektiv 3
$f_L$ (nominal) [mm]	12,50	16,00	35,00
$f_L$ [mm]	12,62	16,28	34,82
$b_{LO}$ [mm]	11,75	15,44	34,00
$B$ [mm]	0,375	0,378	0,349

Tab. 1: Geschätzte Kameraparameter für eine Raytrix R5 Kamera mit drei Objektiven jeweils unterschiedlicher Brennweiten ( $f_L = 12,5$  mm,  $f_L = 16$  mm und  $f_L = 35$  mm).

Basierend auf den ermittelten Kameramodellen wurde die Messgenauigkeit der plenoptischen Kamera in Abhängigkeit des Objektabstands  $z_c$  bestimmt. Abbildung 4 zeigt die Wurzel des mittleren, quadratischen Fehlers (root mean square error (RMSE)) in Abhängigkeit des Objektabstands für die drei unterschiedlichen Objektive. Hier ist zu sehen, dass die Messunsicherheit sowohl mit dem Objektabstand als auch mit der Brennweite ansteigt.[4]



(a)



(b)

Abbildung 3: (a) Das 3D-Kalibrierobjekt ist mit maschinell detektierbaren Marken versehen, die automatisch erkannt werden. (b) geschätzte Aufnahmeposition der plenoptischen Kamera (rot) sowie 3D-Koordinaten der Referenzpunkte (schwarz) (Foto: Niclas Zeller)

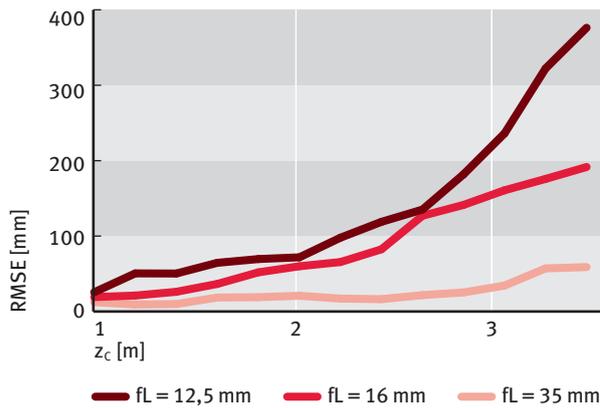


Abb. 4: Tiefengenauigkeit RMSE einer plenoptischen Kamera (Raytrix R5) in Abhängigkeit des Objektstands  $z_c$  für unterschiedliche Brennweiten der Hauptlinse. Die Messwerte basieren auf dem oben beschriebenen Kameramodell.

### SLAM basierend auf einer plenoptischen Kamera

Mit Hilfe der geschätzten Tiefenkarte und der Intensitäten in den Bildern ist es möglich, aus einer Videosequenz die relative Orientierung aufeinanderfolgender Aufnahmen zu schätzen. Dafür werden die Pixel einer Referenzaufnahme in die Mikrobilder der neuen Aufnahme projiziert. Anhand der Intensitätswerte beider Aufnahmen wird eine Kostenfunktion definiert, auf der basierend die relativen Orientierungsparameter optimiert werden. Ist die relative Orientierung zwischen zwei Aufnahmen bekannt, so können wiederum korrespondierende Punkte zwischen den Mikrobildern dieser Aufnahmen gesucht und somit die bereits bestehende Tiefenkarte verbessert werden. Eine korrekte Korrespondenz vorausgesetzt, kann verallgemeinert gesagt werden: je größer der Abstand zwischen den Aufnahmen, umso genauer ist die errechnete Tiefe. Um eine zu starke Fortpflanzung von Orientierungsfehlern zu vermeiden, die sich ebenfalls negativ auf die Tiefenschätzung auswirken, wird die relative Orientierung einer Aufnahme immer auf ein so genanntes Referenzbild bezogen. Solange eine ausreichende Überlapung zum Bildausschnitt der neuen Aufnahme besteht,

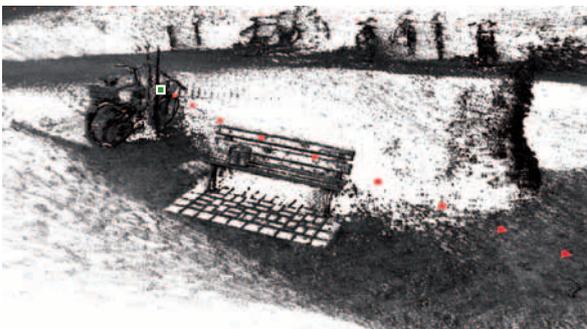


Abb. 5: 3D-Rekonstruktion, die auf SLAM basierend mittels einer plenoptischen Kamera berechnet wurde. In Rot sind die Kamerapositionen der Referenzbilder und in Grün ist die aktuelle Kameraposition dargestellt.

wird das Referenzbild beibehalten. Wird ein neues Referenzbild benötigt, so wird die Tiefenkarte des letzten Referenzbildes in die neueste Aufnahme projiziert und diese als neues Referenzbild definiert. Auf diese Weise wird Schritt für Schritt die Bewegungstrajektorie der Kamera bestimmt sowie eine globale 3D-Karte der Umgebung erstellt, die sich aus den Tiefenkarten der einzelnen Referenzbilder zusammensetzt. Abbildung 5 zeigt eine 3D-Rekonstruktion sowie die zugehörige Bewegungstrajektorie, die durch unseren plenoptischen SLAM-Algorithmus berechnet wurde.

Durch die redundanten Abbildungen in den Mikrobildern bietet dieses auf einer plenoptischen Kamera basierende Verfahren ein robusteres Trackingverhalten gegenüber beispielsweise monokularen Ansätzen. Außerdem ist es aufgrund der aus den Einzelaufnahmen erlangten Tiefeninformation bis zu einem gewissen Grad möglich, auch die Skalierung der Szenen mitzubestimmen, welche bei monokularen Ansätzen komplett verloren geht.

### Literatur

- [1] G. Lippmann, *Epreuves réversibles. Photographies intégrales*, Comptes Rendus De l'Académie Des Sciences De Paris, **146**, pp. 446-451, 1908.
- [2] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, P. Hanrahan, *Light field photography with a handheld plenoptic camera*, Stanford University Computer Science Tech Report, CSTR 2005-02, 2005.
- [3] A. Lumsdaine, T. Georgiev, *The focused plenoptic camera*, IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1–8, 2009.
- [4] N. Zeller, F. Quint, U. Stilla, *Depth estimation and camera calibration of a focused plenoptic camera for visual odometry*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **118**, pp. 83-100, 2016.

- [5] N. Zeller, C.A. Noury, F. Quint, C. Teuliere, U. Stilla, M. Dhome, *Metric Calibration of a Focused Plenoptic Camera based on a 3D Calibration Target*, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Proc. ISPRS Congress 2016), III-3, pp. 449-456, 2016.



**Wie wird eine Fabrik mit Energie versorgt? Wie können in einem Stadion 70.000 Menschen ein Spiel genießen? Und wie kommt der richtige Koffer in das richtige Flugzeug?**

Unsere Ingenieure sind international im Einsatz, um Großprojekte zu planen und zu betreiben. Mit fast 3.000 Mitarbeitern vereinigt b.i.g. die Vorzüge eines Familienbetriebs mit denen eines international operierenden Unternehmens. Verstärken Sie eine der größten Ingenieurgesellschaften Deutschlands.

Wir suchen deutschlandweit

**Ingenieure u. Werkstudenten** (m/w) der Fachrichtungen:

Baumanagement und Baubetrieb, Elektrotechnik, Energietechnik, Nachrichtentechnik, Wirtschaftswissenschaften

**Jetzt bewerben:** b.i.g.-Gruppe, Katharina Ottinger, Ehrmannstraße 6, 76135 Karlsruhe oder [karriere@big-gruppe.com](mailto:karriere@big-gruppe.com)



[big-gruppe.com](http://big-gruppe.com)

beraten ■ planen ■ betreiben

### Abstract

A complete mathematical model for focused plenoptic cameras is defined in this article. It describes the relation between object coordinates and virtual image coordinates of the camera. This model includes the physical dimensions of the plenoptic camera as well as a distortion model, which corrects the imperfect main lens. The camera model is determined in a calibration process based on a 3D calibration target. Furthermore, a plenoptic SLAM-Algorithm is presented which implements the plenoptic camera model.

### Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein komplettes mathematisches Modell für fokussierte plenoptische Kameras definiert, welches den Zusammenhang zwischen Objektkoordinaten und virtuellen Bildkoordinaten der Kamera beschreibt. Dieses Modell umfasst die physikalischen Größen der plenoptischen Kamera sowie ein Verzeichnungsmodell, das die nichtideale Hauptlinse korrigiert. Zur Bestimmung des Kameramodells wird ein Kalibrierverfahren durchgeführt, das auf einem 3D-Referenzobjekt basiert. Des Weiteren wird ein plenoptischer SLAM-Algorithmus vorgestellt, in dem das plenoptische Kameramodell Anwendung findet.

### Autoren

**Niclas Zeller M.Eng.**

Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Karlsruhe

**Prof. Dr.-Ing. Franz Quint**

Professor an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Franz Quint

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [franz.quint@hs-karlsruhe.de](mailto:franz.quint@hs-karlsruhe.de)

Telefon: 0721 925-2254

# Membran-basierte Polymer-Lichtwellenleiter für miniaturisierte optofluidische Sensoren

Christoph Prokop und Christian Karnutsch

Am Institute for Optofluidics and Nanophotonics (IONAS) der Hochschule Karlsruhe ist ein neuartiges Laminationsverfahren für dünne Kunststoffschichten entwickelt worden, welches erlaubt, Licht effizient in planare Membran-basierte Kunststoff-Lichtwellenleiter einzukoppeln. Solche Strukturen können anschließend für eine Vielzahl von Anwendungen in den Applikationsfeldern Mikrofluidik, Mikrooptik und Optofluidik verwendet werden.

Aufgrund des geringen verfügbaren Brechungsindexkontrasts von konventionellen Polymeren (Brechungsindex typischerweise zwischen 1,3 und 1,7) ist die optische Effizienz von miniaturisierten photonischen und optofluidischen Bauteilen aus Kunststoffen sehr limitiert. Eine am IONAS entwickelte Laminationsmethode ermöglicht es, sowohl unstrukturierte als auch mikrostrukturierte Membranen aus SU-8 Fotolack über einen Mikrokanal (bzw. eine Luftkavität) aus KMPR Fotolack zu laminieren.[1] Das Laminieren findet dabei mit einem abgeformten Silikonstempel (PDMS) statt. Durch die entwickelte Technik können sowohl unstrukturierte als auch mikro- und nano-strukturierte Membranen mit einer winzigen Schichtdicke von nur 500 Nanometern hergestellt werden. Die Besonderheit im Hinblick auf Lichtwellenleiter ist hierbei, dass die Membran von Luft umgeben ist und somit den höchstmöglichen Brechungsindexkontrast für polymerphotonische Bauteile aufweist. Weiterhin ermöglichen diese sehr dünnen Membranen, dass infrarotes Licht mit nur einer Mode geführt werden kann.

Um die entwickelte Laminationsmethode für miniaturisierte optofluidische Sensoren nutzen zu können, muss zunächst Licht in die dünnen Membranen eingekoppelt werden. Dazu wurden die bewährten Kopplungsmethoden über die Endfacette des Wellenleiters sowie Oberflächengitterkoppler, die Licht über optische Fasern in Wellenleiter ein- und auskoppeln können, untersucht. [2, 3] Speziell Oberflächengitterkoppler sind aufgrund ihrer Positioniertoleranz und Lichtkopplungseffizienz sehr gut geeignet. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Membran-basierten Wellenleiters inklusive zweier Gitterkoppler.

Die Luftkavitäten, die als Mikrokanal ausgeführt sind, haben neben dem Vorteil der effektiveren Lichtführung die weitere Funktion, dass ein zu untersuchender Analyt

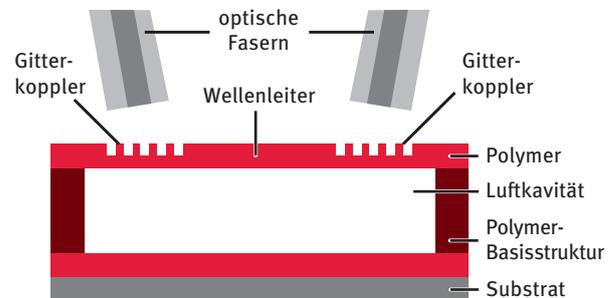


Abb. 1: Schematischer Aufbau Membran-basierter Gitterkoppler zur effizienten Licht-Ein- und Auskopplung in laminierte Polymer-Lichtwellenleiter.

eingbracht werden und somit einem miniaturisierten optofluidischen Sensorsystem zur Verfügung stehen kann. Nachdem numerische Simulationen Aufschluss über geeignete Bauteilparameter lieferten, konnte in Experimenten gezeigt werden, dass ein einzelner Oberflächengitterkoppler eine Effizienz von etwa 8 dB (circa 16 %) bei einer Lichtwellenlänge von 1557 nm aufweist. [3] Um die realisierten Gitterkoppler als optofluidische Sensoren ausnutzen zu können, führt man beispielsweise einen Analyten mit Hilfe einer mikrofluidischen Kapillardrossel unter eines der beiden Gitter. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen optofluidischen Sensors.

Durch einen Mikrokanal wird der Analyt einem Seitenkanal zugeführt, wobei eine mikrofluidische Kapillardrossel den Analyten temporär eine gewisse Zeit aufhält,

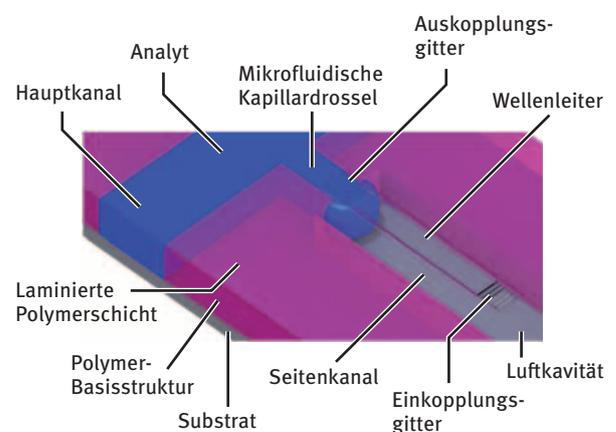


Abb. 2: Schema eines optofluidischen Sensors basierend auf Oberflächengitterkopplern.

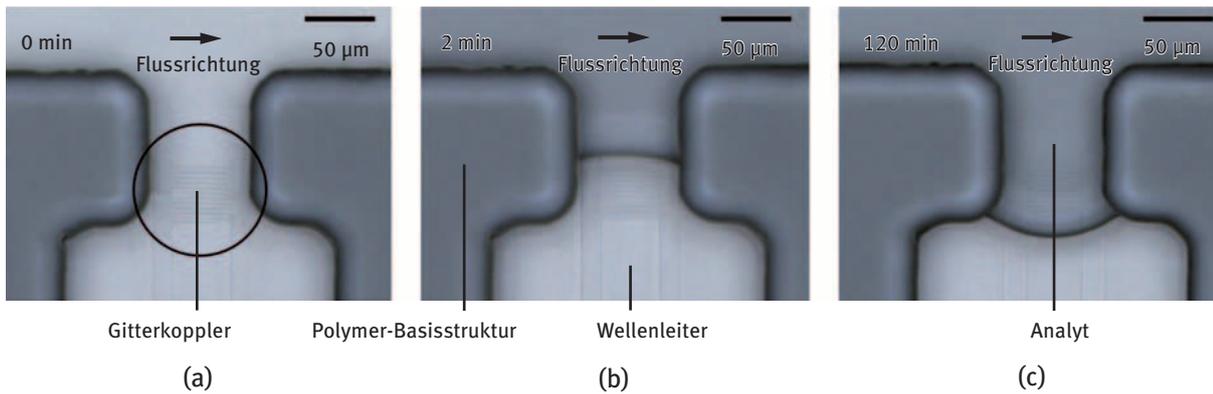


Abb. 3: Hergestellter optofluidischer Sensor und Veranschaulichung der Funktionsweise der mikrofluidischen Kapillardrossel. Nach dem Einbringen des Analyten verlangsamt die Kapillardrossel die Geschwindigkeit der voranschreitenden Flüssigkeit durch eine Querschnittsverengung. Dadurch kann ein Analyt bis zu 120 Minuten direkt unter dem Auskopplungsgitter aufgehalten und dadurch analysiert werden.

sodass sich der Analyt nur unter dem Auskopplungsgitter befindet. Wird nun Licht in den Sensor durch das Einkopplungsgitter eingekoppelt, wird es über den Membran-Wellenleiter zum Auskopplungsgitter geführt. Dort angekommen ist das evaneszente Feld der Lichtmode dem Analyten ausgesetzt, wobei sich je nach Brechungsindex des Analyten der effektive Brechungsindex der Lichtmode ändert. Diese Brechungsindexänderung resultiert in einer Änderung der spektralen Antwort des Sensors, die mit Hilfe eines Spektrometers detektiert wird. Abb. 3 zeigt einen am IONAS hergestellten optofluidischen Sensor und veranschaulicht die Funktionsweise der mikrofluidischen Kapillardrossel.

In anschließenden Experimenten mit verdünnten Zuckerlösungen konnte gezeigt werden, dass sich das Spektrum des Auskopplungsgitters mit ansteigendem Brechungsindex des Analyten zu höheren Wellenlängen hin verschiebt (s. Abb. 4) und dass eine Reduktion

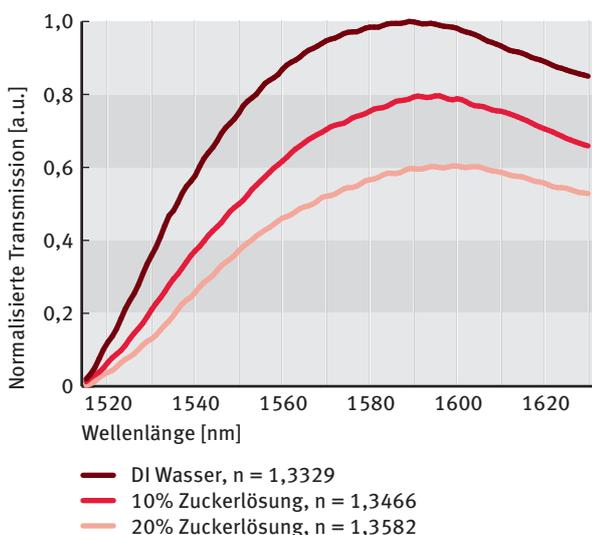


Abb. 4: Experimentell ermittelte Spektren des optofluidischen Brechungsindexsensoren.

der ausgekoppelten Lichtintensität auftritt. Übereinstimmend mit den vorausgegangenen Simulationen beträgt die Sensitivität dieses optofluidischen Sensors 400 nm pro Brechungsindexeinheit (RIU) sowie 17 dB pro Brechungsindexeinheit, wenn man die Intensitätsabnahme betrachtet.[4] Im Vergleich mit international publizierten Werten weist der Sensor somit eine hohe Sensitivität auf.

## Referenzen

- [1] C. Prokop, S. Schoenhardt, T. Mahmud, A. Mitchell, C. Karnutsch, *Bonding of SU-8 films onto KMPR structures for microfluidic, air-suspended photonic and optofluidic applications*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 26(5), pp. 055001-055009, 2016.
- [2] C. Prokop, P. Kleeßen, N. Irmeler, A. Mitchell, C. Karnutsch, *Air-suspended polymer rib waveguides*, in SPIE OPTO, International Society for Optics and Photonics, San Francisco, United States of America, Proc. SPIE 9365, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIX 2015.
- [3] C. Prokop, S. Schoenhardt, B. Laegel, S. Wolff, A. Mitchell, C. Karnutsch, *Air-Suspended SU-8 Polymer Waveguide Grating Couplers*. Journal of Lightwave Technology, 34(17), pp. 3966-3971, 2016.
- [4] C. Prokop, N. Irmeler, B. Laegel, S. Wolff, A. Mitchell, C. Karnutsch, *Optofluidic refractive index sensor based on air-suspended SU-8 grating couplers*, Sensors and Actuators A: Physical, submitted November 2016.

**Abstract**

The aim of the presented work is to conduct research on chip-based sensor systems for optical analysis of liquids in the fields of medical and environmental analysis. Highly sensitive miniaturized polymer platforms using optical grating structures are explored to enhance the interaction of light and analyte solutions.

**Zusammenfassung**

Ziel der vorgestellten Arbeiten ist die Erforschung eines chipbasierten miniaturisierten optofluidischen Sensorsystems zur hochsensitiven photometrischen Untersuchung von flüssigen Analyten. Dabei sollen fingernagelgroße Plattformen aus Kunststoff entwickelt werden, deren verbesserte Interaktion von Licht und Analyt für sensorische Anwendungen in der medizinischen Diagnostik und Umwelttechnik geeignet sind.

**Autoren**

**Christoph Prokop M.Eng.**

Akademischer Mitarbeiter und Doktorand an der Hochschule Karlsruhe im Rahmen des PhD Studies Agreements zwischen der Hochschule Karlsruhe und des Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), University Melbourne, Australien

**Prof. Dr.-Ing. Christian Karnutsch**

Professor für Optosensorik an der Hochschule Karlsruhe, Leiter des Institute for Optofluidics and Nanophotonics (IONAS), Leiter des Deutsch-Australischen Studienzentrums für Optofluidik und Nanophotonik (SCON) sowie Adjunct Professor des Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), University Melbourne, Australien

**Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Christian Karnutsch  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  
Institute for Optofluidics and Nanophotonics (IONAS)  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: christian.karnutsch@hs-karlsruhe.de  
Telefon: 0721 925-1352



Als Mitarbeiter entwickle ich Messtechnik für die Prozessautomatisierung, die weltweit im Einsatz ist.

# LEITER- PLATTE + KARRIERE- LEITER

Als Mensch bietet mir das Familienunternehmen viele Wege, mich fachlich und persönlich zu entwickeln. Das ist meine Formel für Zufriedenheit.

## Entdecken auch Sie Ihre Formel für Zufriedenheit

Endress+Hauser ist ein international führender Anbieter von Messgeräten, Dienstleistungen und Lösungen für die industrielle Verfahrenstechnik. So verbindet die Mitarbeit bei uns immer zwei Seiten: die technische plus die menschliche. Das Ergebnis: ein Mehr an Zufriedenheit. Jeden Tag.

Wir suchen regelmäßig Interessenten (m/w) für Praktika, Abschlussarbeiten sowie Direkteinstieg in folgenden Fachrichtungen:

- Elektrotechnik
- Informatik
- Wirtschaftsingenieurwesen
- Maschinenbau
- Automatisierungstechnik
- Nachrichtentechnik

Informieren + Bewerben geht am einfachsten unter [www.endress.com/karriere](http://www.endress.com/karriere)

Endress+Hauser GmbH+Co. KG  
Katrin Schmidt, Melanie Stock  
Hauptstraße 1  
79689 Maulburg  
Tel.: +49 7622 28 3000  
students@pcm.endress.com

Endress+Hauser 

# Elektrochemische Detektion von militärischen Altlasten

Peter Rabenecker und Karsten Pinkwart

Spätestens seit dem Ende des 2. Weltkriegs beschäftigt das Thema „alte Munition in den Meeren“ Medien, Gesellschaft und Politik in unregelmäßigen Intervallen. Die Detektion von Munitionsaltlasten im Meer gestaltet sich dabei als komplexe Aufgabe. Der im Rahmen dieses Artikels vorgestellte Ansatz versucht die Detektion über den Nachweis der durch Diffusion oder Korrosionsöffnungen austretenden Explosivstoffe. Meerwasser als ionisch leitendes Lösungsmittel erscheint zwar als ein günstiges Messmedium für einen elektrochemischen Sensor, die Zusammensetzung und damit die Eigenschaften variieren jedoch stark. Auch das Spektrum der Zielsubstanzen ist groß, so finden sich beispielsweise Altlasten mit konventioneller Munition wie 2-Methyl-1,3,5-trinitrobenzen (TNT) und Perhydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazin (RDX), brandfördernder Munition (z. B. weißer Phosphor) sowie chemische Kampfstoffe wie Phosgen und Tabun. Eine geringe Löslichkeit und ein damit einhergehender langsamer Anstieg der zur Detektion verfügbaren Stoffmengen der Zielsubstanzen sowie deren starke Verdünnung durch das Meerwasser erschweren den sicheren Nachweis zusätzlich.

Eine räumlich breit gestreute und zeitlich sukzessive Freisetzung all dieser Zielsubstanzen über Jahre oder Jahrzehnte hinweg aus nahezu allen bisher noch ausreichend intakten Behältnissen im Rahmen von Korrosion wird von Experten als wahrscheinlich angesehen. [1] Diese freiwerdenden Schadstoffe vergiften die Meeresumwelt, reichern sich in Meeresorganismen an [2] und stellen damit eine schwerwiegende Kontamination in den Gewässern dar. Darüber hinaus stellen Minen und Munition nicht unerhebliche wirtschaftliche Hindernisse dar, indem sie den Bau von Windparks und Kabeltrassen behindern und hier schwer kalkulierbare Mehrkosten erzeugen. So fielen bei der Anbindung des Windparks Riffgat durch die Firma TenneT TSO GmbH beispielsweise 100 Mio. Euro zusätzliche Kosten an, wovon 57 Mio. Euro auf die trotz Vorstudien kostenmäßig unterschätzte Munitionsräumung entfielen.[3]

Eine effektivere, schnellere und kostengünstigere Räumung der Altlasten wird also dringend benötigt. In diesem Kontext wurden die hier vorgestellten Arbeiten durchgeführt, um zukünftig eine effektive Nachweismethode zur Verfügung zu haben.

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal beschäftigt sich im Rahmen eines

durch die Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen der Bundeswehr, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) öffentlich geförderten Projekts mit der Entwicklung eines Sensorsystems zur Detektion von TNT in Meerwasser. Im Verlauf dieser Untersuchungen wurden mehrere Abschlussarbeiten im Masterstudiengang „Sensorsystemtechnik“ an der Hochschule Karlsruhe thematisch integriert.

Soll ein Gebiet auf das Vorhandensein von Munitionsaltlasten hin geprüft werden, kommt im ersten Schritt ein Sonar als etablierte Untersuchungsmethode für ein schnelles großflächiges Screening des Meeresbodens zum Einsatz. Hierbei wird meist eine Vielzahl von Objekten entdeckt, bei denen es unklar ist, ob es sich um harmlose oder gefährliche und somit zu räumende Objekte handelt. Die nähere Inspektion der verdächtigen Fundstellen und die Entscheidung, ob eine Räumung notwendig ist, erfolgt bislang zumeist durch Taucher – was eine kostenintensive, zeitaufwändige und zugleich gefährliche Vorgehensweise ist.

Der Detektionsansatz hingegen beruht auf der Identifizierung eines verdächtigen Objekts durch den Vortornachweis der Wirkladung und fokussiert sich im ersten Schritt auf Explosivstoffe. Dies kann durch ein elektrochemisches Sensorsystem erfolgen, das von einem unbemannten Unterwasserfahrzeug an die verdächtigen Objekte herantransportiert wird.

Das entwickelte Sensorsystem besteht aus einem Sensorkopf (s. Abb. 1 a)), in dem eine Reaktionskammer mit den Messelektroden sowie eine Pumpe untergebracht sind. Diese sensorische Einheit ist mit einem druckfesten Gehäuse verbunden, in dem sich die Elektronikkomponenten (Potentiostat, Mini-PC, Pumpentreiber, Stromversorgung) befinden (s. Abb. 1 b)). Es wurden zwei verschiedene Versionen des Sensorsystems entwickelt, die in unterschiedlichen Einsatzszenarien verwendet werden. Eines wurde für die Verwendung auf einem AUV (Autonomous Underwater Vehicle) konzipiert. Es ist ein komplett autonom arbeitendes selbstlernendes System, basierend auf einer SVN (Support Vector Machine), das lediglich über ein Blinklicht das Vorhandensein eines Explosivstoffs nach außen kommuniziert. Das zweite System wurde für den Einsatz auf einem ROV (Remotely Operated Vehicle) aufgebaut. Es nutzt die Energieversorgung und Kommunikation des Unterseefahrzeugs und kann von Bord eines Begleitschiffs aus ferngesteuert werden.

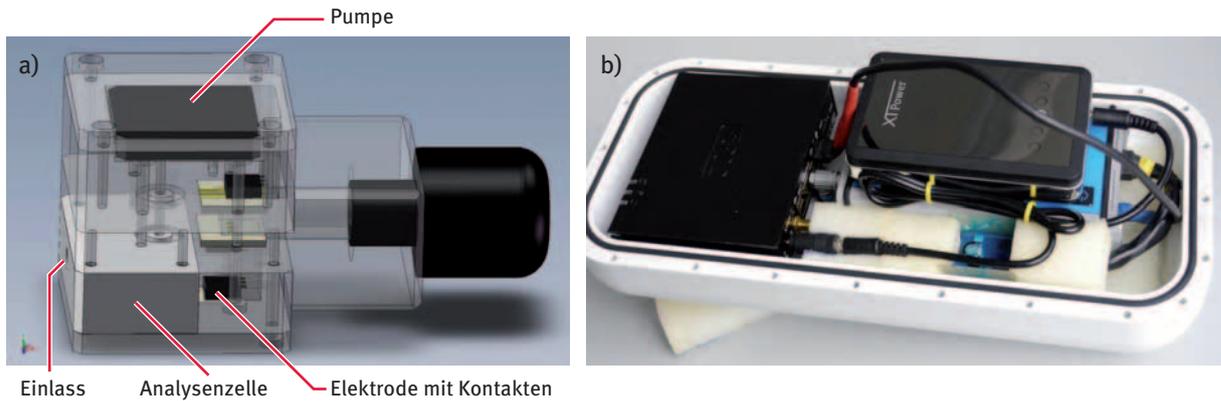


Abb. 1: a) Sensorkopf; b) geöffnetes Gehäuse mit Rechner, Potentiostat und Energieversorgung (Foto: Peter Rabenecker)

Das eigentliche Sensorsystem basiert auf etablierten elektrochemischen Messverfahren zur Detektion von Explosivstoffen.[4] Hierbei erfolgt die Umsetzung (Oxidation oder Reduktion) der Zielsubstanz an einer Elektrodenoberfläche. Der bei der Reaktion stattfindende Ladungsübergang, also der Reaktionsstrom, dient als Messgröße (s. Abb. 2 am Beispiel TNT). Aus der Tatsache, dass die Zielmoleküle zwingend an der Elektrodenoberfläche vorhanden sein müssen wird klar, dass der Sensor möglichst dicht an das zu überprüfende Objekt platziert werden muss bzw. die Zielmoleküle an den Sensor herangetragen werden müssen – ähnlich dem Prozess des Auffindens von Drogen durch einen Spürhund.

An die im Sensorkopf integrierten Elektroden wird eine variable Spannung angelegt. Die konkrete Spannung (entsprechend der zur Verfügung stehenden Reaktionsenergie), bei der ein Stromanstieg gemessen werden kann, ist spezifisch für die stattfindende elektrochemische Reaktion (wie beispielsweise die Reduktion einer Nitrogruppe des TNT; s. Abb. 2). Die Höhe des gemessenen Stroms (oder genauer: die Fläche unter der Messkurve) ist dabei der umgesetzten Stoffmenge proportional, sodass neben der qualitativen Aussage des Vorhandenseins einer bestimmten Zielsubstanz auch eine quantitative Aussage über die vorliegende Konzentration getroffen werden kann (s. Abb. 3).

Die praktische Funktionalität des Sensorsystems wurde zwischenzeitlich mehrfach bei Seeversuchen in der

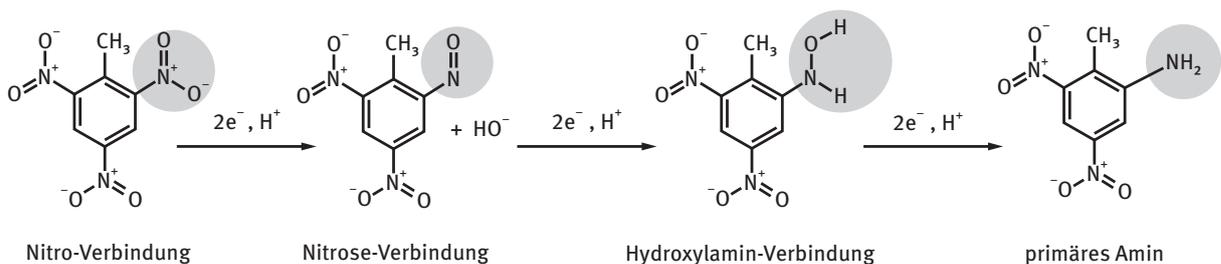


Abb. 2: Reduktion einer Nitrogruppe des TNT

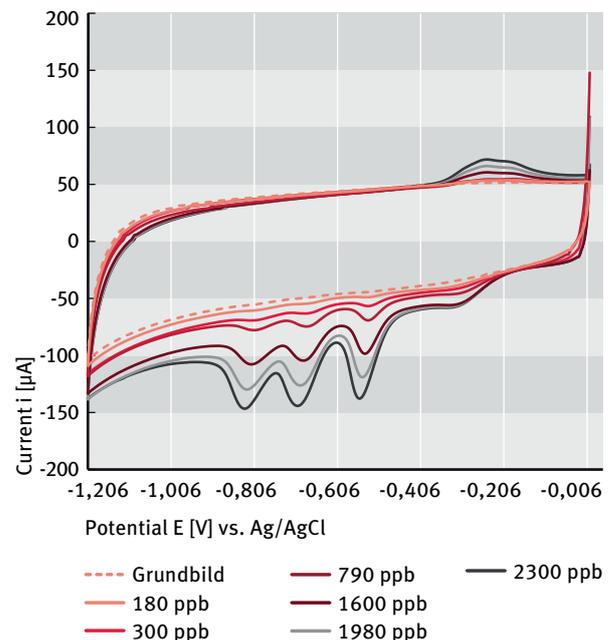


Abb. 3: Elektrochemische Detektion unterschiedlicher Konzentrationen von TNT

Nord- und Ostsee in Deutschland und Polen erfolgreich getestet (s. Abb. 4). Eine Messung läuft hierbei so ab, dass das unbemannte Unterseeboot entgegen der Meeresströmung – damit die Zielmoleküle durch die Strömung an den Sensor herantransportiert werden – auf das als verdächtig eingestufte Objekt zufährt. Dabei werden mit sich verringerndem Abstand ständig (je nach gewünschter Empfindlichkeit alle 5 bis 30 Sekun-

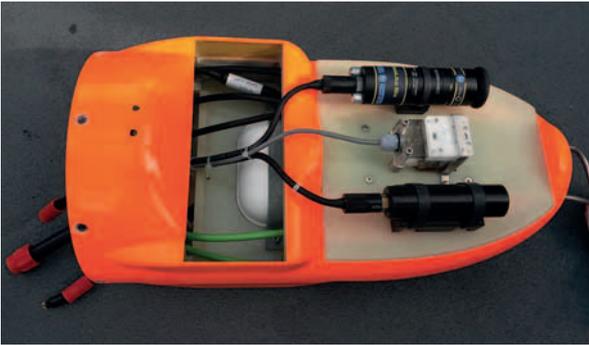


Abb. 4: Sensorsystem im Lastkopf eines unbemannten Unterwasserfahrzeugs (SeeKatze der Firma ATLAS ELEKTRONIK GmbH); links im Detail, rechts beim Einsatz (Fotos: Peter Rabenecker)

den) durch eine Pumpe Proben eingezogen und direkt elektrochemisch untersucht. Die Messwerte werden dann regelmäßig mit zwischen den Messläufen vorgenommenen Blindmessungen verglichen und ausgewertet. Durch diese vergleichenden Messungen können sich ändernde Messparameter (Salzgehalt, Leitfähigkeit, pH-Wert des Meerwassers, Vorhandensein weiterer nicht-detektionsrelevanter Substanzen) abgefangen werden.

Nach der erfolgreichen Detektion bzw. Identifikation einer Altlast folgt die Beseitigung der Munitionsaltlast. In diesem Zusammenhang sei auf die Arbeiten zur vollautomatisierten (also ohne den Einsatz von Tauchteams) und detonationsfreien Beseitigung eines bereits detektierten Kampfmittels am Fundort im Rahmen des BMWi-geförderten Projekts [5] (ROBEMM) verwiesen. Die praktischen Untersuchungen zeigten, dass das im Rahmen mehrerer Abschlussarbeiten von Absolventen der Hochschule Karlsruhe entwickelte elektrochemische Sensorsystem eine erfolgreiche Detektion von Altlasten in Meereswasser ermöglichte. Die Entwickler hoffen nun, dass mit Hilfe ihres Verfahrens die Installation von Windkraftanlagen und deren notwendige Anbindung mittels Kabeltrassen schneller vollzogen werden kann und damit der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter voranschreitet. Es ist aber natürlich auch ihr Wunsch, die Umwelt von den Altlasten der Vergangenheit zu befreien.

### Literatur

- [1] Bericht *Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer – Bestandsaufnahme und Empfehlungen der Ad-hoc-AG Munitionsaltlasten im Meer*, Expertengruppe der Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (ARGE BLMP Nord- und Ostsee) vom 05. Dezember 2011.
- [2] G. R. Lotufo, *Whole-body and body-part-specific bioconcentration of explosive compounds in sheepshead minnows*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 74, Issue 3, March 2011, Pages 301-306, ISSN 0147-6513, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.07.039>.
- [3] Pressemitteilung Firma TenneT TSO GmbH: *57 Millionen Euro für 30 Tonnen Munition: TenneT schließt Windpark Riffgat an vom 11.02.2014*. Abgerufen am 16.03.2016.
- [4] P. Rabenecker and K. Pinkwart, *A Look Behind Electrochemical Detection of Explosives. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34: 274–279. [doi:10.1002/prep.200800112](https://doi.org/10.1002/prep.200800112)
- [5] Robotisches Unterwasser-Bergungs- und Entsorgungsverfahren inklusive Technik zur Delaboration von Munition im Meer, insbesondere im Küsten- und Flachwasserbereich (ROBEMM); <http://www.munitionsraeumung-meer.de/nationale-forschung/robemm/>

**Zusammenfassung**

Munitionsaltlasten in der Nord- und Ostsee aus den Weltkriegen stellen eine Gefahr für die Gesundheit und ein Hindernis bei der Installation von Offshore-windparks dar. Die sichere Detektion ist ein schwieriges und zeitaufwendiges Unterfangen. Der Artikel beschreibt ein elektrochemisches Sensorsystem, das von einem unbemannten Unterwasserfahrzeug an verdächtige Objekte herangetragen wird. Der Sensor prüft das Objekt auf das Vorhandensein von Explosivstoffen, um so zu entscheiden, ob es sich um Munition oder ein ungefährliches Objekt handelt. Das System konnte bereits bei mehreren Seeversuchen erfolgreich eingesetzt werden.

**Abstract**

Munition from the two World Wars contaminates the North Sea and the Baltic Sea, and presents a danger to the health of people and an obstacle to the installation of offshore wind parks. Reliable detection is a difficult and time-consuming process. The article describes an electrochemical sensor system which is conveyed to suspicious objects by an unmanned underwater vehicle. The sensor tests

for the presence of explosives in the object, in order to determine whether it is munition or a harmless object. The system has already been successfully used in several trials carried out at sea.

**Autoren**

Dipl.-Ing. (FH) Peter Rabenecker

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Angewandte Elektrochemie, 76327 Pfinztal

Prof. Dr. rer. nat. Karsten Pinkwart

Professor an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Karlsruhe sowie  
Stellv. Produktbereichsleiter Angewandte Elektrochemie im Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, 76327 Pfinztal

**Kontakt**

Prof. Dr. rer. nat. Karsten Pinkwart  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: karsten.pinkwart@hs-karlsruhe.de  
Telefon: 0721 925-1360



JE HELLER DER KOPF, UMSO BRILLANTER DIE IDEE.

THIS IS **SICK**

Sensor Intelligence.

Ambitionierter Nachwuchs mit Weitblick gesucht. Bringen Sie Ihre Talente in Sensorlösungen ein, die weltweit Standards setzen und die nächste industrielle Revolution mitgestalten. Ihre Möglichkeiten: Praktika, Abschlussarbeiten oder Berufseinstieg. Ihr Umfeld: hochprofessionell, international und inspirierend. Ihr neuer Arbeitgeber: ein Hightech-Unternehmen mit weltweit mehr als 7.400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Ihre Zukunftsadresse: [www.sick.de/karriere](http://www.sick.de/karriere)



# Mehrsprachigkeit im interkulturellen Behördenhandeln – Herausforderungen und Lösungen in Form von virtuellem Dolmetschen. Das Projekt Virtueller Dolmetscherpool (VIP)

Andrea Cnyrim

Noch vor dem massiveren Zustrom von Schutzsuchenden in die Bundesrepublik Deutschland erkannte die Entwicklungsagentur Rheinland-Pfalz in den Vorgesprächen zu dem Projekt Virtueller Dolmetscherpool (VIP) Anfang des Jahres 2015, welche Bedeutung der Verständigung mit Menschen aus dem arabischen Sprachraum im behördlichen Handeln zukommen würde. Das am 05.08.2016 in Kraft getretene Integrationsgesetz sollte eine schnellere Integration in den Arbeitsmarkt erlauben. Daher wurde ein erhöhter Bedarf an sicherer, dem Datenschutz entsprechender Verständigung zusätzlich bei den Jobcentern erwartet. In diesem Zusammenhang entstand die richtungweisende Idee, einen Virtuellen Dolmetscherpool einzurichten, der es vor allem ländlichen, von den Zentren weiter entfernten Verbandsgemeinden und Kommunen erlauben sollte, auch dann die Verständigung schnell und sicher herzustellen, wenn Face-to-Face arbeitende Dolmetscherinnen und Dolmetscher schwer erreichbar waren. Dies schien ganz besonders vor dem Hintergrund dringend notwendig, da die Menschen aus diesem Kulturraum zunehmend in der Fläche untergebracht wurden und die Gemeinden vor Ort nicht hinreichend auf die dadurch entstehenden Herausforderungen vorbereitet waren.

Das Projekt wurde von der Entwicklungsagentur Rheinland-Pfalz beauftragt und finanziert und gemeinsam

durch die Verfasserin von der Hochschule Karlsruhe und Herrn Prof. Dr. Bernd Meyer von der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Fachbereich Translations-, Sprach- und Kulturwissenschaft (FTSK) wissenschaftlich betreut. Diese Zusammenarbeit sicherte die erforderliche Professionalität bei der Entwicklung eines Konzepts für einen Virtuellen Dolmetscherpool und die Auswahl, Schulung und Begleitung der Dolmetscherinnen und Dolmetscher. Die besonderen Qualitätsmerkmale des zu erprobenden Modellprojekts waren die solide Ausbildung der eingesetzten Dolmetscherinnen und Dolmetscher, ihre Allparteilichkeit, die Wahrung der Vertraulichkeit neben ihrer kulturellen Zugehörigkeit zum arabischen und/oder kurdischen Sprach- und Kulturraum, ihre große Vertrautheit mit Behördenabläufen sowie mit der Ausgangssituation der Klienten. Zum Zeitpunkt des Projektstarts im Mai 2015 gab es noch keine gut funktionierenden Angebote dieser Art in Deutschland. Insofern bestand die größte Innovation des Projekts darin, zu erforschen, welche Besonderheiten bei der Organisation und beim Betreiben eines Virtuellen Dolmetscherpools auftreten würden.

Zum Konzept gehörte es, zunächst eine begrenzte Anzahl von Modellgemeinden auf die Nutzung des Virtuellen Dolmetscherpools vorzubereiten. Dies erfolgte mithilfe einer Website und mittels Flyern. Besondere

## Virtueller Dolmetscherpool – باللغة العربية /Arabisch



Entwicklungsagentur  
Rheinland-Pfalz e.V.



Abb. 1: Projekt Virtueller Dolmetscherpool (VIP)

Bedeutung kam den Schulungen zu, die zu Beginn des Projekts in den Modellgemeinden durchgeführt wurden. Bei diesen Schulungen wurde gleichzeitig auch der Bedarf erhoben und erfragt, wie der Dolmetschbedarf bisher gedeckt wurde. Erstaunlicherweise zeichnete sich schon früh ab, dass manche Kommunen nur recht zögerlich auf das Angebot kostenloser professioneller Dolmetscherinnen und Dolmetscher reagierten, die durch einen einfachen Anruf oder auch über die Website gebucht werden konnten. Andere Gemeinden hingegen zeigten große Begeisterung und nutzten den Virtuellen Dolmetscherpool intensiv. Schwieriger als angenommen erwies es sich jedoch, die Behörden trotz des offensichtlichen Mehrwerts zur tatsächlichen Nutzung dieser Dienstleistung zu überzeugen.

Das war insofern außerordentlich problematisch, als in der behördlichen Praxis auf Sprachmittler zurückgegriffen wurde, die oft nicht als solche ausgebildet waren, zum Teil keine fachliche Kenntnis der behördlichen Prozesse oder der jeweiligen Fachgebiete hatten und nicht zuletzt, weil sie oft selbst Migranten waren und teils sogar von den Klienten Geld für ihre Dienste verlangten. Daher war es erstaunlich, dass bei den Behörden kein höheres Problembewusstsein vorhanden war. Beispielsweise wurde die achtjährige Tochter einer Klientin herangezogen, um in der Schwangerschaftsberatung ihrer aus Syrien geflüchteten Mutter aus gesundheitlichen Gründen zum Abbruch zu raten. Dass dies eine unzumutbare Belastung für das Kind darstellen musste, bedarf keines weiteren Kommentars. Auch wenn dies sicher ein extremes Beispiel ist, stellt es Angehörige immer vor besondere Herausforderungen, wenn sie für ihre Familienangehörigen dolmetschen. Professionelle Dolmetscherinnen und Dolmetscher dagegen beherrschen Techniken der Distanzierung und der Verarbeitung. Die im Projekt eingesetzten Dolmetscherinnen und Dolmetscher wurden darüber hinaus im Rahmen des Projekts begleitet, um eventuell belastende Erlebnisse zu verarbeiten. Bei erwachsenen Dolmetscherinnen und Dolmetschern aus der ‚Community‘ besteht eventuell auch die Gefahr von Retraumatisierungen, wenn sie durch die Dolmetschtätigkeit wieder mit Umständen konfrontiert werden, die sie selbst noch nicht vollständig verarbeitet haben. All dies spricht dagegen, auf Laien zurückzugreifen, seien es Angehörige der Klienten oder seien es andere Migranten.

Hinzu kommt, dass professionelle Dolmetscherinnen und Dolmetscher sich fachlich auf die Situation vorbereiten, die sie dolmetschen sollen, um das entsprechende Fachvokabular ebenso bereitzuhalten wie die erforderlichen Spezialkenntnisse über die Situation. Die Breite der vom Virtuellen Dolmetscherpool abgedeckten Gebie-

te reichte dabei von juristischen Fragen wie ALG II, Asyl- und Aufenthaltsrecht sowie Ausreisemöglichkeiten bzw. Familiennachzug über zum Teil komplexe Gesundheitsfragen bis hin zu Elterngesprächen und Jugendamtsangelegenheiten, aber auch zu Bankangelegenheiten, Arbeitsvermittlung und Qualifikationsnachweisen sowie Alltagsfragen rund um Wohnen, Einrichten, öffentliche Transportmittel etc., die natürlich unterschiedliche Grade an Komplexität aufweisen. Eine der Besonderheiten des Behördendolmetschens ist es jedoch, dass die Gespräche oft unerwartet auf Fachgebiete ausgeweitet werden, die vorher nicht absehbar waren. Damit kommen qualifizierte Dolmetscher in der Regel mühelos zurecht, da sie hierfür ausgebildet sind.

Doch nicht jedes behördliche Gespräch eignet sich auch für die Verdolmetschung per Telefon oder Videokonferenz. Längere Beratungs- und Therapiegespräche wurden daher von Anfang an vom Projekt ausgenommen. Entstand dennoch ein solcher Bedarf im Zuge eines Einsatzes, verwiesen die Dolmetscherinnen und Dolmetscher auf den von Prof. Dr. Meyer betriebenen Germersheimer Face-to-Face-Dolmetscherpool bzw. auf vergleichbare ehrenamtliche Angebote in der Region der Klienten. Im Projekt wurde von 15- bis maximal 30-minütigen Gesprächen ausgegangen. Selten fanden auch Gespräche bis zu 60 Minuten statt. Das kürzeste Gespräch dauerte drei Minuten, das längste 108 Minuten.



Abb. 2: Die Dolmetscherin Rahaf Farag im Einsatz (Foto: Alexandre Bakhtiarov)

Nach der Startphase mit intensiven Nutzerschulungen in den Modellgemeinden im Zeitraum Mai bis Anfang Juni 2015 ging das Projekt von Mitte Juni bis Ende Oktober in den Regelbetrieb über. Die Telefondolmetscherinnen und -dolmetscher standen von Montag bis Freitag jeweils von 9 bis 16 Uhr zur Verfügung. Obwohl das Angebot kostenlos war, wurde es überraschenderweise auch dann nicht so stark genutzt wie erwartet, als es auf alle Kommunalverwaltungen und Organisationen in freier Trägerschaft sowie Wohlfahrtsverbände in ganz Rheinland-Pfalz ausgedehnt wurde.

Besondere Pluspunkte des Projekts waren die gesicherte Qualität der Dolmetschleistung (alle Dolmetscherinnen und Dolmetscher waren Absolventen der FTSK mit überdurchschnittlichen Studienleistungen) die Neutralität der Dolmetscherinnen und Dolmetscher und die Einhaltung des Datenschutzes. Die Leistung wurde niedrigschwellig angeboten und konnte mit vorhandenen Technologien abgerufen werden. Skype wurde auch deshalb wenig genutzt, weil viele Behörden zögerten, das Programm auf Dienstrechnern zu installieren. Trotz der großen Vorteile des VIP gaben etliche Kommunalverwaltungen ihre bisher etablierten Verständigungspraxen (sei es rudimentäres Englisch oder Laiendolmetschen) nicht auf, weil dort kein realistisches Bewusstsein für die negativen Konsequenzen mangelnden Datenschutzes und unzureichender Dolmetschleistungen vorhanden ist und deren Auswirkungen auf die fachliche Qualität der eigenen Arbeit unterschätzt wird. Auch die zeitliche Begrenzung des Projekts auf sechs Monate mag ein Grund dafür gewesen sein, die bisher funktionierende Verständigungspraxis nicht aufzugeben. Die Ergebnisse des Projekts wurden im Rahmen einer von der Verfasserin betreuten Master-Thesis wissenschaftlich fundiert evaluiert. Neben der Entwicklung und Erprobung des Virtuellen Dolmetscherpools wurde auch ein Organisationsmodell für einen dauerhaften meh-



Abb. 3: Das VIP-Team (v.l.n.r.): Alexandre Bakhtiarov, Omed Kaled, Anna Kindler, Univ.-Prof. Dr. Bernd Meyer, Ann-Kathrin Leutz, Rahaf Farag, Prof. Dr. Andrea Cnyrim. (Foto: Christophe Mitlehner)

rere Sprachen umfassenden Virtuellen Dolmetscherpool für Rheinland-Pfalz von den Projektbetreuern erarbeitet.

Interessant ist die Beobachtung, dass seit dem Ende des Modellprojekts verschiedene ähnliche Angebote entstanden sind, etwa die Videodolmetscher-Hubs in Bedarfsaußenstellen des Bundesamts für Migration und Flüchtlinge (Erprobung ab März 2016) oder auch die App der Xplando GmbH aus Kaiserslautern.

### Abstract

In local authorities language barriers hamper communication and lead to a loss of efficiency. Nevertheless, migrants with insufficient German language skills are increasingly housed in rural areas where there is very little experience of the target group and only a few qualified language mediators available. Rhineland-Palatinate's Development Agency commissioned the testing of a Virtual Interpretation Pool that would meet high quality standards. The surprising result was that the local authorities remained reluctant to use the offer – despite its obvious advantages.

### Zusammenfassung

Sprachbarrieren erschweren die Kommunikation und führen zu Effizienzverlusten in Behörden. Doch Migranten mit geringen Deutschkenntnissen werden zunehmend im ländlichen Raum untergebracht. Dort gibt es weniger Erfahrung mit der Zielgruppe und nur selten qualifizierte Sprachmitt-

ler. Im Auftrag der Entwicklungsagentur Rheinland-Pfalz wurde ein Virtueller Dolmetscherpool erprobt, der hohe Qualität gewährleisten sollte. Das überraschende Ergebnis: Trotz der offensichtlichen Vorteile waren die Behörden zum Teil nur schwer von der Nutzung des Angebots zu überzeugen.

### Autorin

**Prof. Dr. phil. Andrea Cnyrim**

Professorin für Interkulturelle Kommunikation an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Leiterin des Instituts für Fremdsprachen der Hochschule Karlsruhe

### Kontakt

Prof. Dr. phil. Andrea Cnyrim  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: [andrea.cnyrim@hs-karlsruhe.de](mailto:andrea.cnyrim@hs-karlsruhe.de)

# batterX<sup>®</sup>

VERSCHIEDENE  
ENERGIEQUELLEN

MÖGLICHE  
EINSATZGEBIETE



100% STABIL  
Online USV Technologie

Deutschland +49 6241 98728-50  
info@batterx.io  
batterx.io

# ANTRIEB BEWEGT ZUKUNFT

BEWEGEN SIE  
MIT

**SEW**  
EURODRIVE



Über 120 Studenten bewegen bei uns jedes Jahr Zukunft: Steigen Sie ein in die faszinierende Welt der Antriebstechnik – mit **Praktikum**, **Werkstudententätigkeit** oder **Abschlussarbeit**.



Mehr Informationen?  
Direkt bewerben?  
Wir freuen uns auf Sie!

[www.sew-eurodrive.de/studenten](http://www.sew-eurodrive.de/studenten)