

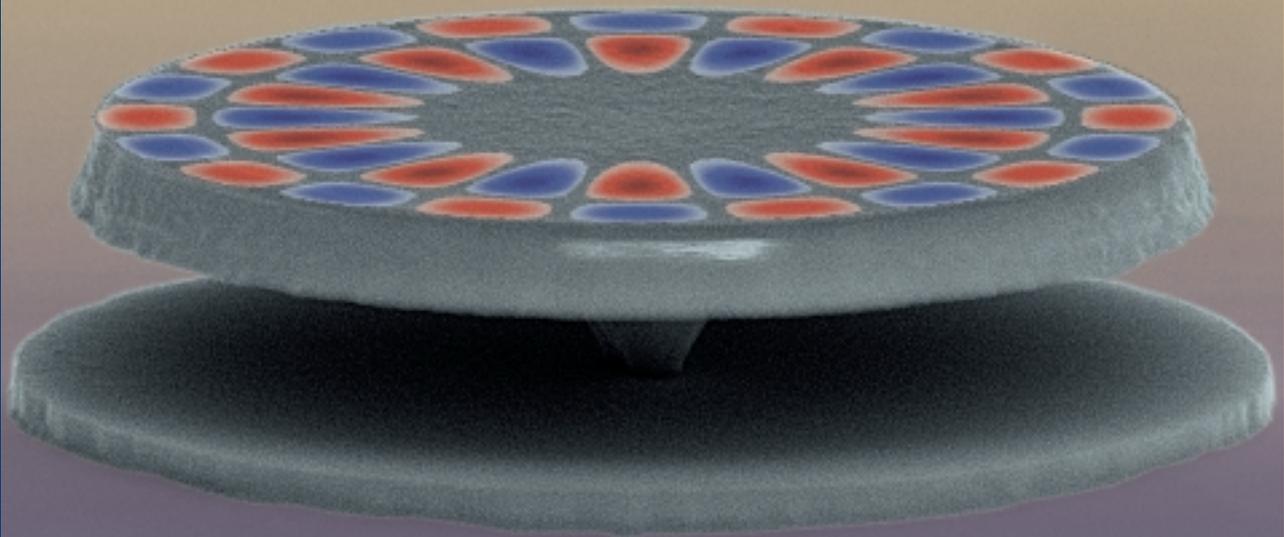
# FORSCHUNGS FORUM

**PADERBORN**



UNIVERSITÄT PADERBORN  
*Die Universität der Informationsgesellschaft*

14-2011



PADERBORNER WISSENSCHAFTSMAGAZIN

- Computersimulation von Nanostrukturen
- Globalisierung im Fußball
- Energieeffizientes Internet der Zukunft
- Elektromobilität in Paderborn
- Erleuchtung durch die Energie der Liebe
- Saubere Energie als gesparte Energie

## IMPRESSUM

Herausgeber  
Prof. Dr. Nikolaus Risch  
Präsident der Universität Paderborn

Konzeption und Redaktion  
Ramona Wiesner  
Leiterin des Referats Hochschulmarketing  
und Universitätszeitschrift  
Warburger Str. 100, 33098 Paderborn  
05251 60-2553, -3880  
wiesner@zv.uni-paderborn.de  
www.uni-paderborn.de/hochschulmarketing

Frauke Döll, Volontärin  
frauke.doell@upb.de

ForschungsForum Paderborn (ffp) im Internet  
www.uni-paderborn.de/ffp

Wissenschaftlicher Beirat  
Prof. Dr. techn. Gitta Domik  
Prof. Dr. Hermann Kamp  
Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Schäfer  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Schuhmann  
Prof. Dr. rer. nat. Artur Zrenner

Drucklegung  
Januar 2011

ISSN (Print) 1435-3709

Layout  
PADA Werbeagentur  
Heierswall 2, 33098 Paderborn

Anzeigenverwaltung  
PADA Marketingverlag  
Heierswall 2, 33098 Paderborn  
05251 527577

Auflage  
5 000

## Titel

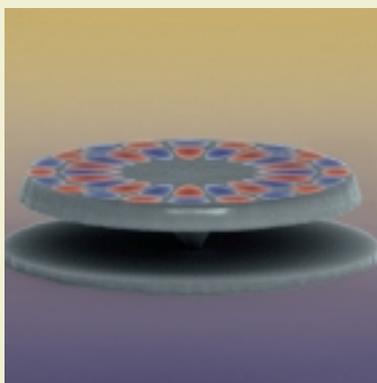


Abb.: Arbeitsgruppe Prof. Cedrik Meier

Eine elektronenmikroskopische Aufnahme eines Halbleiterbauelements für photonische Anwendungen. Die Struktur, deren Durchmesser mit drei  $\mu\text{m}$  ungefähr einem Dreißigstel des Durchmessers eines menschlichen Haares entspricht, dient dazu, Licht auf engstem Raum einzu-

sperrern. Eine mögliche räumliche Verteilung des Lichtfeldes in der Struktur ist mit dem blau-roten Muster angedeutet. Die Struktur und die Rechnungen entstanden in der Arbeitsgruppe von Prof. Cedrik Meier in der Experimentalphysik im Rahmen des Dissertationsprojekts von Karoline Piegdon. Mehr über Simulationen von optoelektronischen Bauelementen im Beitrag von Prof. Torsten Meier ab Seite 6.

## Editorial



Ramona Wiesner  
Leiterin des Referats Hochschulmarketing und Universitätszeitschrift

Liebe Leserinnen und Leser,

das Wissenschaftsjahr 2010 widmete sich der Zukunft der Energie. Unsere Universität hat zu diesem Thema viele interessante Forschungsprojekte angeschoben, von denen wir Ihnen einige vorstellen wollen. So lesen Sie zum Beispiel ab Seite 12, wie der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik neue Strategien zur nachhaltigen Prozessintensivierung entwickelt. Ziel ist es, bei minimalem Energieaufwand die maximale Produktivität zu erreichen. Die Forscher haben dabei energieintegrierte Apparate und Mikrostrukturapparate ebenso im Blick wie Wärmetauscher, Verdampfer und Kondensatoren. Die gewonnenen Ergebnisse tragen ihren Teil zum europäischen Verbundprojekt F<sup>3</sup> Factory „Flexible, Fast and Future Factory“ bei, das die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Chemieindustrie stärken soll.

Ebenfalls vor dem Hintergrund der F<sup>3</sup> Factory siedelt Prof. Dr. Warnecke seine Forschungen im Bereich Polymere Materialien an. Unter seiner Leitung erforscht das Fachgebiet Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik eine neue Apparatechnik für einen Prototyp der Fabrik der Zukunft. Wie ein so genannter Knetzer als Hochviskos-Reaktor dazu beiträgt, energetische und stoffliche Ressourcen zu schonen, berichten wir ab Seite 18.

Auch die Energieeffizienz der Informationstechnologie muss verbessert werden. Hier gilt es nicht nur die Geschwindigkeit und den Durchsatz der Geräte zu erhöhen, sondern gleichzeitig ihre Umweltfreundlichkeit zu verbessern. Dafür können verschiedene Ansätze und Techniken eingesetzt werden. Welche Verfahren und Methoden ein energieeffizientes Netz der Zukunft weben, zeigen wir ab Seite 44.

Mit dem Thema Elektromobilität beschäftigt sich Prof. Dr. Böcker vom Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik (LEA). Die Forschungsarbeiten im LEA konzentrieren sich auf die beiden Schwerpunkte elektrischer Antrieb und Energiespeicher. Denn die Elektromotoren müssen zuverlässiger, leiser und kostengünstiger werden. Auch die Leistungsfähigkeit und Reichweite der Batterie wollen die Forscher optimieren. Daher arbeiten sie an einem hybriden Energiespeichersystem. Mehr zu den Kerntechnologien für die Automobile von morgen erfahren Sie ab Seite 50.

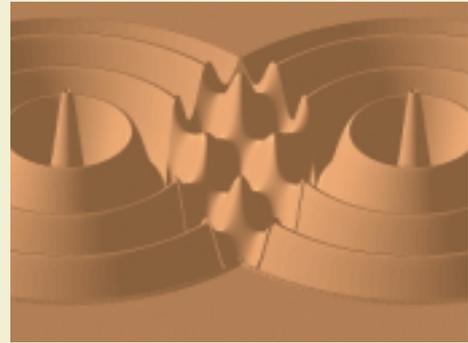
Neben dem prägenden Thema Energie gibt es selbstverständlich noch andere spannende Forschungsprojekte, zum Beispiel die bilaterale Arbeit zum „Turkish-German Relations and Cultural Transfer“ der Universitäten Paderborn und Istanbul. Pünktlich zum 50. Jahrestag des Anwerbeabkommens zwischen Deutschland und der Türkei nehmen beide Partner sowohl linguistische als auch historisch-kulturwissenschaftliche sowie literaturwissenschaftliche Aspekte ins Visier. Tauchen Sie ab Seite 26 ein in die Welt türkisch-deutschen Lebens und lernen Sie die vielfältige Kulturproduktion kennen.

Eine interessante Lektüre wünscht  
Ihre Ramona Wiesner

Seite 6

### Kontrolle von Licht- und Elektronenwellen

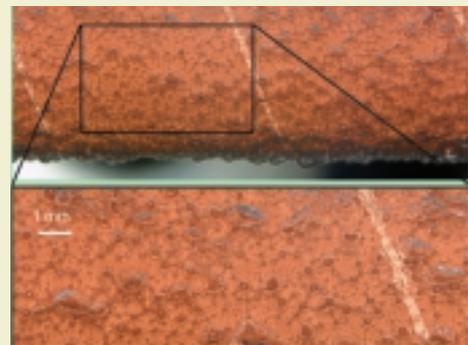
Computersimulationen optischer und elektronischer Eigenschaften von Nanostrukturen  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Torsten Meier, Dr. rer. nat. Jens Förstner,  
Dr. rer. nat. Matthias Reichelt



Seite 12

### Prozessbezogene Energieeffizienz

Die sauberste Energie ist die gesparte Energie  
Prof. Dr.-Ing. habil. Eugeny Kenig



Seite 18

### Der Kneiter

Ein innovativer chemischer Hochviskos-Reaktor  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Warnecke, M. Sc. Oliver Seck,  
B. Sc. Marko Gemmerich, Dr.-Ing. Christian Hennig



Seite 26

### Türkisch-deutsche Literatur und Kultur

Die Arbeit des bilateralen Forschungsprojekts  
„Turkish-German Relations and Cultural Transfer“  
Prof. Dr. Michael Hofmann, Tobias Zenker M. A.



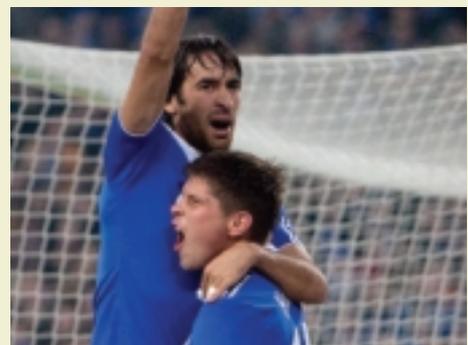
Seite 32

**Ein traumhaftes Buch:  
Die Hypnerotomachia Poliphili**  
Ein Albtraum für den Übersetzer?  
Prof. Dr. phil. Rafael Arnold



Seite 38

**Raul zu Schalke, Özil und Khedira zu Madrid**  
Die Globalisierung des Arbeitsmarktes für Fußball-Profis  
Prof. Dr. rer. pol. Bernd Frick



Seite 44

**Ein energieeffizientes Internet der Zukunft**  
Neue Architekturen und Optimierungen senken Kosten  
Prof. Dr. rer. nat. Holger Karl, Dipl.-Inf. Christian Dannewitz,  
Matthias Herlich, M. Sc.



Seite 50

**Elektromobilität in Paderborn**  
Kerntechnologien für Automobile von morgen  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Dipl.-Ing. Tobias Huber,  
Dipl.-Ing. Christoph Romaus, Dipl.-Ing. Andreas Specht



# TechnologiePark Paderborn

## Zukunft findet statt.

- + Hervorragende Rahmenbedingungen für innovative, technologieorientierte Unternehmen und Unternehmensgründer
- + Vermietung variabler Büro- und Laborflächen
- + Konferenzzentrum mit angrenzendem Bistro
- + Moderne Infrastruktur und umfangreiche Serviceleistungen
- + Effektiver Know-How Transfer
- + Enge Kooperation mit der Universität Paderborn
- + Attraktive Grundstücke zur Bebauung



**Konzentrierter Fortschritt**

**TechnologiePark**  
GmbH **Paderborn**

[www.technologiepark-paderborn.de](http://www.technologiepark-paderborn.de)





Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Schäfer

## Vorwort

*Liebe Leserinnen und Leser,*

*wie gelingt es, die weltweit steigende Nachfrage nach Energie zu befriedigen und gleichzeitig das Klima zu schonen? Droht der Menschheit Energieknappheit? Fragen, die sich jeder Mensch in verschiedener Intensität schon einmal gestellt hat. Dementsprechend sind heutzutage Begriffe wie „Erneuerbare Energie“, „Solarenergie“ oder „Windenergie“ fast jedem geläufig.*

*Nachdem die früheren Wissenschaftsjahre einzelne Disziplinen, Fächergruppen oder Persönlichkeiten der Wissenschaft zum Thema hatten, geht es in diesem elften Wissenschaftsjahr um das Thema, welches für die heutige und nachfolgende Generationen eine existenzielle Bedeutung hat – „Die Zukunft der Energie“.*

*Die Wissenschaftsjahre haben sich im Lauf der letzten zehn Jahre als ein erfolgreiches Instrument etabliert, Menschen – insbesondere Kindern und Jugendlichen – die Welt der Forschung näher zu bringen. Durch diese Sensibilisierung für die Wissenschaft ist es nunmehr an der Zeit, auch ein so sensibles Thema wie das der „Energie“ zu vermitteln. Die Frage nach der Zukunft der Energie ist eine kollektive Frage aller Menschen. Sie ist eine Herausforderung an Politik, Wirtschaft und Wissenschaft.*

*Eine Eigenschaft für die Fragestellung nach der Zukunft der Energie, wie für wissenschaftliche Fragestellungen im Allgemeinen, ist von besonders elementarer Bedeutung: Neugier.*

*Neugier ist die beste Motivation, sich schwierigen Anforderungen zu stellen. Die Wissenschaft kann uns durch motiviert geprägte Forschung und Entwicklung die nötigen Instrumente für zukünftige Energiefragen an die Hand geben. Forschung zum Thema Energie ist dabei, wie bei so vielen anderen wissenschaftlichen Themen, nur in Teamarbeit erfolgreich. Unterschiedliche wissenschaftliche Fachdisziplinen müssen sich demnach eng verzahnen, um die Forschung, die sich mit Fragestellungen nach einer umweltverträglichen und effizienten Nutzung verschiedener Energieträger sowie neuer Energieformen und Ressourcen befasst, erfolgreich weiterzubringen. Ziel ist es, gute Lösungen für die Energieversorgung der Zukunft zu finden.*

*Die Themen des aktuellen ForschungsForums Paderborn beweisen, dass auch am Wissenschaftsstandort Paderborn dem Thema Energie und Energieeffizienz in besonderem Maße nachgegangen wird, wenn es beispielsweise um eine prozessbezogene Energieeffizienz oder um ein energieeffizientes Internet der Zukunft geht.*

*Ein weiteres Beispiel für ein Energie-Thema im Bereich Forschung und Entwicklung zeigt eine aktuelle Kooperation zwischen der Benteler Automobiltechnik, der Fraunhofer Einrichtung für Elektronische Nanosysteme und der Universität Paderborn zum Thema Abgasenergieerückgewinnung. Hier zeigt sich einmal mehr, welchen wichtigen Stellenwert die Zukunft der Energie einnimmt. Durch die Zusammenarbeit von lokaler Industrie und Universität wird die Innovationskraft einer Region genutzt, um das Themenfeld der Energie zukunftsfähig und verträglich mitzugestalten.*

*Nur die kollektive Neugier aller Menschen in Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft kann die Zukunft der Energie positiv beeinflussen.*

*In diesem Sinne wünsche ich allen Leserinnen und Lesern mit dem aktuellen ForschungsForum eine spannende Lektüre, die hoffentlich neugierig auf die wissenschaftlichen Themen unserer Zeit macht.*

Wilhelm Schäfer

Vizepräsident für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs

# Kontrolle von Licht- und Elektronenwellen

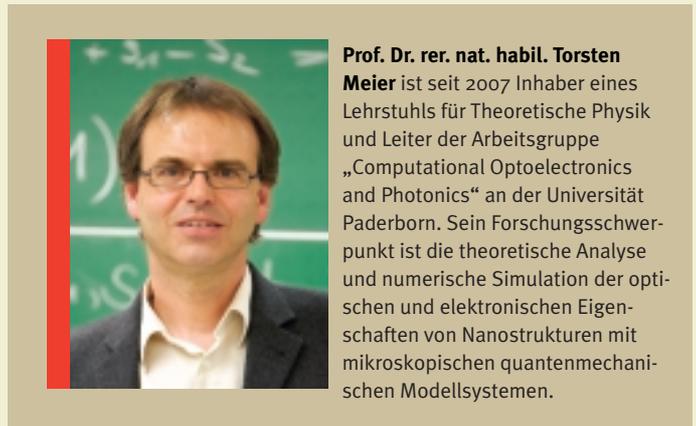
## Computersimulationen optischer und elektronischer Eigenschaften von Nanostrukturen

Prof. Dr. rer. nat. habil. Torsten Meier, Dr. rer. nat. Jens Förstner, Dr. rer. nat. Matthias Reichelt

Das Prinzip, mit Licht elektrischen Strom zu erzeugen, wird in jeder Solarzelle ausgenutzt, während der umgekehrte Prozess in Leuchtdioden angewendet wird, um effizient elektrischen Strom in Licht umzuwandeln. Das Wechselspiel zwischen Licht und Elektronen, den Trägern des elektrischen Stromes, und deren Anwendungen wird in der Optoelektronik erforscht. Durch Strukturierung geeigneter Materialien auf sehr kleinen Längenskalen können sowohl die optischen als auch die elektronischen Eigenschaften gezielt modifiziert werden. Computersimulationen spielen hierbei eine wichtige Rolle, um ein grundlegendes Verständnis zu entwickeln und um Nanostrukturen mit optimierten Eigenschaften für konkrete Anwendungen zu entwerfen.

In der heutigen Informationstechnologie werden Halbleiter-Bauelemente mit elektronischen und optoelektronischen Funktionalitäten vielfältig genutzt. Die fortwährende Nachfrage nach schnelleren und leistungsfähigeren Systemen führt zu der Notwendigkeit, die Größe der einzelnen Komponenten immer weiter zu verkleinern. In miniaturisierten Bauelementen mit Abmessungen im Bereich von wenigen Nanometern (ein Nanometer entspricht  $10^{-9}$  Meter, das ist der Millionste Teil eines Millimeters!) werden die Elektronen durch die Gesetze der Quantenmechanik beschrieben [1]. Die elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen sind durch die verwendeten Materialien und deren Größe und räumlicher Anordnung bestimmt. Daher existieren vielfältige Möglichkeiten diese Eigenschaften gezielt zu verändern. Auch die Ausbreitung elektromagnetischer Lichtwellen kann durch räumliche Strukturierung geeigneter Materialien drastisch modifiziert werden [2]. Da Elektronen und Licht als Wellen beschrieben werden können, ist es möglich, für das Design ihrer Eigenschaften ähnliche Prinzipien zu verwenden.

Sowohl um die grundlegenden Prozesse, die das Wechselspiel zwischen Licht und Elektronen bestimmen, zu verstehen, als auch um Nanostrukturen für Anwendungen zu optimieren, werden heutzutage Computersimulationen erfolgreich eingesetzt. Für die numerische Beschreibung wird die räumliche Anordnung einer konkreten Nanostruktur auf ein Rechengitter übertragen und die relevanten physikalischen Gleichungen gelöst. Lichtwellen werden dabei mit den Maxwell'schen Gleichungen und Elektronen mit der Schrödingergleichung behandelt. Um aussagekräftige Ergebnisse für realistische Systeme zu erzielen, sind typischerweise Berechnungen mit mehreren Millionen gekoppelter Gleichungen notwendig. Deren numerische Auswertung ist mit vertretbarem Zeitaufwand nur auf sehr schnellen Computern möglich. Die Berechnungen sind oft so aufwändig, dass sie nur auf Parallelcomputern, wie sie beispielsweise im „Paderborn Center for Parallel Computing (PC<sup>2</sup>)“ zur Verfügung stehen, erfolgreich durchgeführt werden können.



**Prof. Dr. rer. nat. habil. Torsten Meier** ist seit 2007 Inhaber eines Lehrstuhls für Theoretische Physik und Leiter der Arbeitsgruppe „Computational Optoelectronics and Photonics“ an der Universität Paderborn. Sein Forschungsschwerpunkt ist die theoretische Analyse und numerische Simulation der optischen und elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen mit mikroskopischen quantenmechanischen Modellsystemen.

Die optischen und elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen werden derzeit weltweit im Hinblick auf grundlegende und anwendungsorientierte Fragestellungen an vielen Orten intensiv erforscht. In Paderborn beschäftigen sich insbesondere die am „Center for Optoelectronics and Photonics (CeOPP)“ und am DFG-Graduiertenkolleg 1464 „Micro- and Nanostructures for Optoelectronics and Photonics“ beteiligten Arbeitsgruppen mit diesem Themengebiet.

### Wellenphänomene

Viele sehr verschiedenartige physikalische Objekte können als Wellen beschrieben werden. Hier sollen zunächst einige grundlegende Aspekte der Wellenausbreitung vorgestellt werden. Betrachten wir beispielsweise Wasserwellen, also eine Abfolge von Wasserbergen und -tälern, die sich entlang der Wasseroberfläche ausbreiten. Abbildung 1 zeigt, dass sich die Wellenberge und -täler ringförmig um den Ort ihrer Erzeugung herum immer weiter ausbreiten. An einem festen Ort vollführt der Wasserspiegel eine Schwingung, das heißt er erhöht und erniedrigt sich periodisch mit der Zeit. Neben der Stärke der Schwingung wird die Welle durch zwei wichtige Größen charakterisiert: die Wellenlänge, die durch den Abstand zweier benachbarter Wellenberge gegeben ist, und die Periode, der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen an einem festen Ort. Diese beiden Größen sind über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, die durch den Quotienten aus Wellenlänge und Periode gegeben ist, miteinander verknüpft. Statt der Peri-

oder wird oft die Frequenz, die die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde angibt, zur Beschreibung verwendet.

Wenn sich, wie auf den unteren Bildern von Abbildung 1 gezeigt, Wellen, die an verschiedenen Orten gleichartig erzeugt wurden, durchdringen, ergibt sich ein kompliziertes Muster von Wellenbergen und -tälern. Dies liegt daran, dass sich bei einer Überlagerung von Wellen die Auslenkungen der einzelnen Wellen addieren. Wenn beispielsweise Berge bzw. Täler zweier Wellen aufeinandertreffen, ergeben sich doppelt so große Berge bzw. doppelt so tiefe Täler. Wenn aber ein Berg der einen Welle auf ein Tal der anderen Welle trifft, löschen sich die beiden Wellen gegenseitig aus. Diesen Prozess der Addition der Auslenkungen von sich überlagernden Wellen nennt man Interferenz. Wenn sich die Einzelwellen zu einer größeren Welle addieren, spricht man von konstruktiver Interferenz, während der Fall der Auslöschung von Wellen als destruktive Interferenz bezeichnet wird. Die Interferenz ist ein allgemeines Prinzip, das für alle Arten von Wellen gültig ist und ausgenutzt werden kann, um deren Ausbreitung zu steuern.

Verschiedene Wellen unterscheiden sich zum einen durch die Art der Anregung, die transportiert wird. Während sich bei Wasserwellen Erhöhungen und Vertiefungen des Wasserspiegels bewegen, sind es bei Lichtwellen elektrische und magnetische Felder. Zum anderen können Wellen sehr unterschiedliche Perioden und Wellenlängen haben. Wasserwellen weisen typischerweise Perioden im Bereich von Sekunden und Wellenlängen von Zentimetern bis Metern auf. Bei Lichtwellen sind die Schwingungsperioden sehr viel kleiner, und die Wellenlängen sind sehr viel kürzer und liegen bei einigen Femtosekunden bzw. im Bereich von einigen Hundert Nanometern. Eine Periode von einer Femtosekunde ( $10^{-15}$  Sekunden) bedeutet, dass die Welle pro Sekunde  $10^{15}$  Schwingungen durchführt. Dies sind Eintausend mal eine Million mal eine Million Schwingungen pro Sekunde (zum Vergleich: ein Mensch atmet während seines gesamten Lebens durchschnittlich ungefähr 800 Millionen mal ein und aus). Aufgrund seiner schnellen Periode ist Licht hervorragend für die Messung ultraschneller Prozesse geeignet und es ist möglich, mit Licht extrem genaue Zeitstandards zu realisieren. Die immense Wichtigkeit präziser Zeitmessungen wird beispielsweise durch die Verleihung des Nobelpreises im Jahre 2005 an den deutschen Physiker Theodor W. Hänsch sowie den US-Amerikaner John L. Hall für ihre Beiträge zur Entwicklung der auf dem Laser basierenden optischen Präzisionsspektroskopie unterstrichen. Aufgrund der kleinen Wellenlänge wird die Interferenz von Licht auch für die Messung kurzer Abstände verwendet.

### **Käfige für Licht:**

#### **Optische Resonatoren**

Die Wellenausbreitung ist stark von der Geometrie und den Materialeigenschaften der Objekte abhängig, in denen sich die Welle bewegt. Ein interessantes Beispiel hierfür sind die so genannten Flüstergaleriemoden (Whispering Gallery Modes), die bei einer kreisförmigen Anordnung geeigneter Materialien auftreten können. Eine in der Nähe des Randes

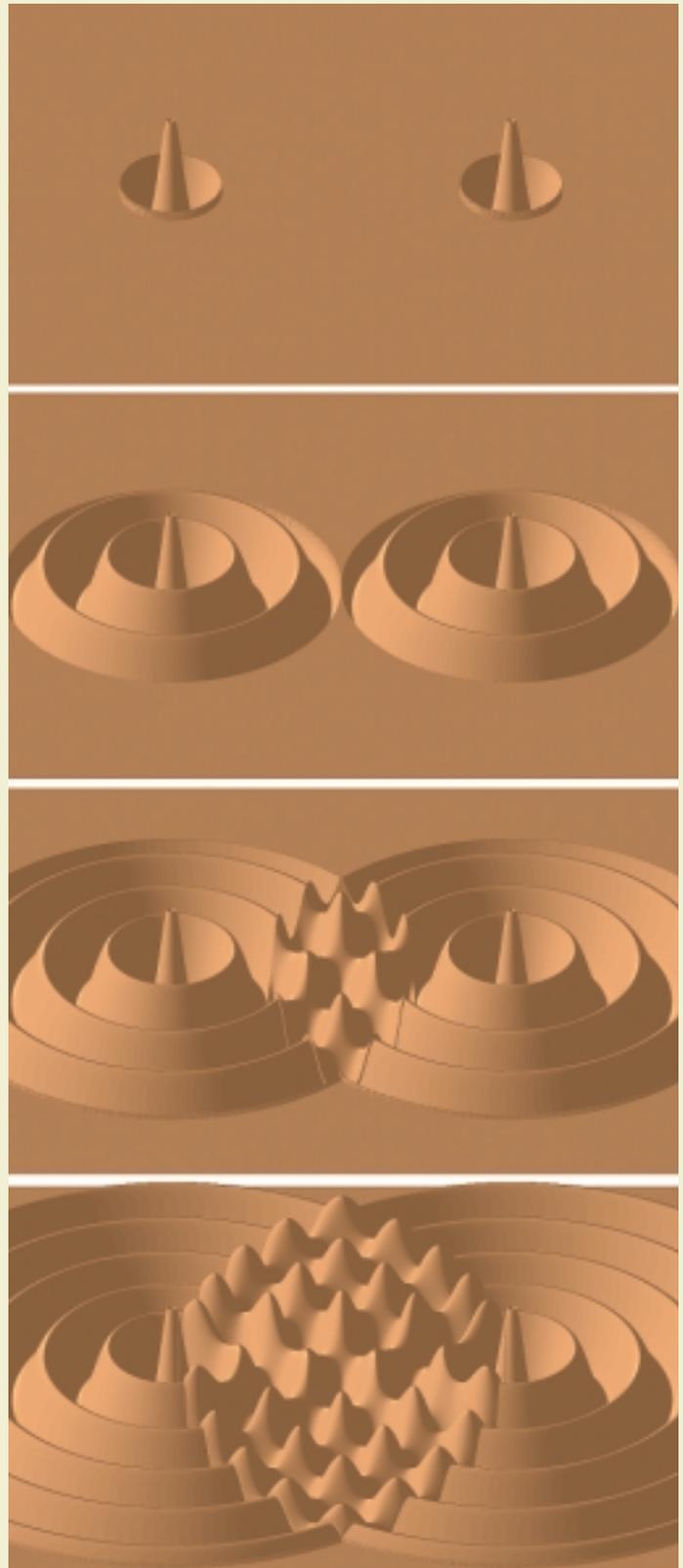


Abb. 1: Beispiel für die Ausbreitung und Interferenz von Wellen, die an zwei Orten erzeugt werden. Mit zunehmender Zeit breiten sich die Wellen um den Ort ihrer Erzeugung ringförmig im Raum aus. Wenn die an den zwei Orten erzeugten Wellen sich durchdringen, kommt es zum Phänomen der Interferenz. Die Maxima und Minima der Gesamtwellen sind durch die Überlagerung der beiden Einzelwellen bestimmt.

erzeugte Welle wird hierbei am Rand des Kreises mehrfach reflektiert, so dass sie kreisförmig umläuft. Wenn bei den Reflektionen nur wenig Energie verloren geht, kann sich die

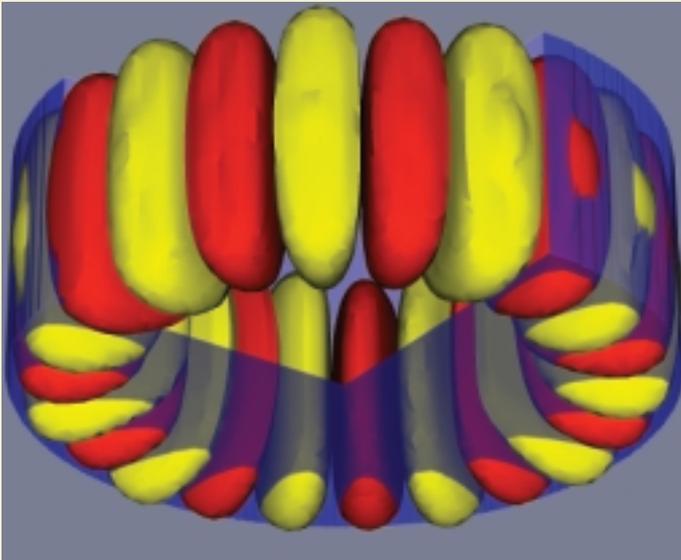


Abb. 2: Oben: Foto der Flüstergalerie (Whispering Gallery) der Saint Paul's Kathedrale in London. Entlang der Innenwände breiten sich Schallwellen mit sehr wenig Dämpfung aus, so dass selbst geflüsterte Worte auf der anderen Seite der Galerie gehört werden. (Quelle: Wikipedia Commons) Unten: Whispering-Gallery-Effekt für Licht in einem zylinderförmigen optischen Resonator. Analog zur Flüstergaleriemode für Schallwellen verknüpft diese spezielle Lichtmode alle Orte in der Nähe des Zylindermantels miteinander.

Welle quasi verlustfrei entlang des Kreisrandes ausbreiten. Dieser Whispering-Gallery-Effekt ist seit langem von Schallwellen bekannt. In Abbildung 2 ist ein Foto der Flüstergalerie der Saint Paul's Kathedrale in London gezeigt. Entlang der Innenwände breiten sich Schallwellen mit sehr wenig Dämpfung aus, so dass selbst geflüsterte Worte auf der anderen Seite der Galerie deutlich hörbar sind.

Der Whispering-Gallery-Effekt tritt auch für Lichtwellen auf. Die in Abbildung 2 berechnete Lichtfeldverteilung erhält man für ein zylinderförmiges dielektrisches Material, das von Luft umgeben ist. Analog zur Flüstergaleriemode für Schallwellen verknüpft diese spezielle Lichtmode alle Orte in der Nähe des Zylindermantels miteinander. Durch die am

Rand des Zylinders stattfindenden Reflektionen ist das Lichtfeld auf einen kleinen Raumbereich beschränkt und kann diesen nicht verlassen. Solche Käfige, die das Licht einsperren, werden optische Resonatoren genannt.

Abbildung 3 zeigt ein anderes Beispiel für einen optischen Resonator. Werden in eine dünne Schicht dielektrischen Materials periodisch angeordnete Luftlöcher im Abstand von einigen 100 Nanometern gebohrt, so erhält man einen so genannten photonischen Kristall. Man kann solche Strukturen so konstruieren, dass die Ausbreitung von Licht gewisser Wellenlängen unmöglich ist. Dieser Effekt beruht auf der destruktiven Interferenz verschiedener Lichtwellen im photonischen Kristall und er tritt auf, wenn die räumliche Periodizität vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichtes ist. Stört man die Ordnung des photonischen Kristalls, indem man z. B. wie in Abbildung 3 gezeigt einige Luftlöcher weglässt, kann man Lichtfelder einfangen, die sich aufgrund der periodischen Strukturierung nicht durch den umgebenden photonischen Kristall fortbewegen können. Auf diese Art kann in optischen Resonatoren das Licht auf sehr kleine Raumbereiche konzentriert werden. Beispielsweise hat die in der Abbildung 3 gezeigte Lichtfeldverteilung (Resonatormode) nur eine Ausdehnung von ungefähr zwei Lichtwellenlängen entlang des Resonators und ist in die senkrechte Richtung noch stärker eingeschränkt.

Werden geeignete Materialien verwendet, erleidet das Lichtfeld in einer Resonatormode nur sehr geringe Verluste. Dies bedeutet, dass das elektromagnetische Feld sehr viele Schwingungen durchführt, bevor es signifikant abklingt. Für zylinderförmige Geometrien ist es möglich, Lichtfelder für einige Zehntausend Schwingungen in einer Resonatormode zu halten. Für andere komplizierte Strukturen ist dies heutzutage sogar für mehr als eine Million Schwingungen gelungen. Trotz dieser imposanten Fortschritte in der Herstellung optischer Strukturen ist man noch weit davon entfernt, den Traum der Bürgerinnen und Bürger von Schilda, die Licht in ihrem Rathaus einfangen wollten, zu realisieren. Wenn man sich daran erinnert, dass die Periode optischer Lichtfelder nur einige Femtosekunden beträgt, so ist selbst das millionenfache dieses Wertes, einige Nanosekunden ( $10^{-9}$  Sekunden, das ist der millionste Teil einer Tausendstelsekunde) immer noch sehr kurz.

Die Frequenzen von Lichtmoden in optischen Resonatoren lassen sich auch durch Veränderung ihrer Umgebung verschieben. Dieser Effekt wurde kürzlich in der Arbeitsgruppe von Cedrik Meier (Experimentalphysik) im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Heinz-Siegfried Kitzerow (Physikalische Chemie) und den Arbeitsgruppen von Jens Förstner und Torsten Meier (Theoretische Physik) demonstriert. Hierzu wurde ein dielektrischer Zylinder (Abbildung 2) in eine Umgebung von Flüssigkristallen gebracht, die durch ein elektrisches Feld ausgerichtet werden können. In einem gegebenen Resonator ließen sich so die Frequenzen der gefangenen Lichtmoden nachträglich durch Veränderung seiner Umgebung verschieben [3]. Dies ist von großem Interesse, wenn man etwa die Moden gezielt auf optische Resonanzen elektronischer Nanostrukturen abstimmen möchte.

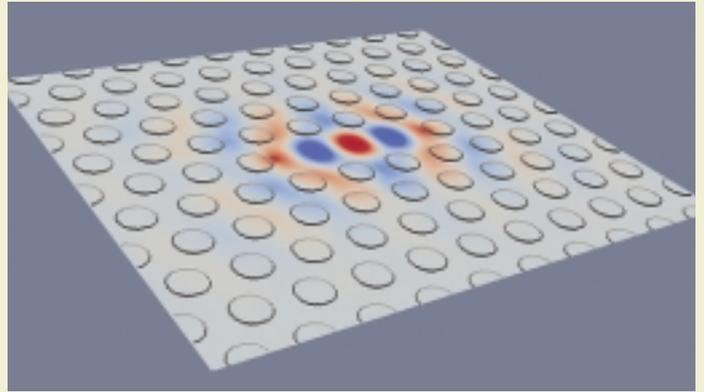
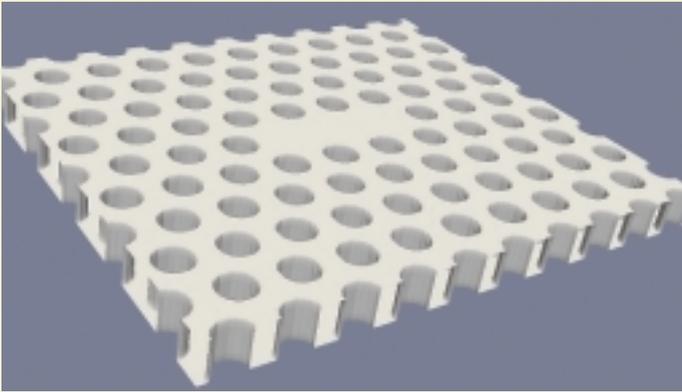


Abb. 3: Optischer Resonator: Mit einer dünnen Materialschicht und speziell angeordneten Luftlöchern kann Licht auf sehr kleine Bereiche konzentriert werden. Links: In der gezeigten so genannten Membranstruktur sind die Abstände der Löcher in etwa halb so groß wie die Wellenlänge des Lichts, also im Bereich von einigen 100 Nanometern. Rechts: Räumlich stark konzentrierte Lichtmode, die sich in dem sehr kleinen Bereich ohne Luftlöcher ausbildet.

### **Künstliche Atome in optischen Resonatoren**

Für Experimente und Anwendungen sind optische Resonatoren aufgrund verschiedener Aspekte sehr interessant. Zum einen kann in Resonatoren Licht mit speziellen Farben (Wellenlängen) gefangen werden und somit das Licht gefiltert werden. Zum anderen kann die Speicherung von Licht in optischen Resonatoren zu sehr starken Feldern führen, da das Licht mit geringen Verlusten auf einen sehr kleinen Raumbereich konzentriert wird. Zudem ist die räumliche Gestalt der gefangenen Moden durch die Geometrie und die Materialien des Resonators bestimmt. Durch die vielfältigen Designmöglichkeiten lässt sich die Wechselwirkung von Licht und Materie signifikant modifizieren und kann für spezielle Zwecke optimiert werden. Ein Anwendungsgebiet ist beispielsweise die Erhöhung der Leistung von Halbleiter-Lasern, die man unter anderem in Laserpointern, CD-/DVD-Spielern, Barcodescannern, Entfernungsmessern, Fertigungsmaschinen und medizinischen Geräten findet.

Ähnlich wie man Licht einsperren kann, kann man auch Elektronen durch Nanostrukturierung mit „quantenmechanischen Mauern“ umgeben. Ist die Bewegung des Elektrons in allen Richtungen auf einen sehr kleinen Raumbereich eingeschränkt, spricht man von einem Quantenpunkt. Da wie bei Atomen (und wie beim Licht im optischen Resonator) nur bestimmte energetische Moden erlaubt sind, bezeichnet man Quantenpunkte auch als künstliche Atome. Durch diese Eigenschaft eignen sich Quantenpunkte als Speicher und Prozessor von Quanteninformation, den sogenannten Qubits. Ziel der Quanteninformationstechnologie ist die Realisierung und Nutzung von Quantencomputern, mit denen viele komplizierte Probleme leichter lösbar sein sollten als auf klassischen Computern. Genauer hierzu ist beispielsweise im Artikel von Artur Zrenner im Forschungsforum Paderborn 2006 zu finden [4].

Elektronen im Quantenpunkt lassen sich mit Lichtfeldern manipulieren. Um eine signifikante Wechselwirkung von Licht und Elektronen zu erreichen, braucht man allerdings starke Lichtfelder. Wie oben gesehen, findet man diese gerade in optischen Resonatoren. Daher ist die Einbettung von Quantenpunkten in optische Resonatoren ein interessantes und wichtiges Forschungsfeld, mit dem sich auch Paderbor-

ner Arbeitsgruppen beschäftigen. Unsere Simulationen, (Abbildung 4) zeigen beispielsweise, wie nicht nur das Lichtfeld das Elektron anregt, sondern wie umgekehrt ein Elektron im Quantenpunkt das Licht beeinflusst. In solch stark gekoppelten Licht-Materie-Systemen kann nicht mehr zwischen den Anregungen des Lichts und des Materials unterschieden werden, sondern es bilden sich neue Zuständen, die partiell optischer und elektronischer Natur sind [5,6].

### **Elektronenwellen durch Licht kontrollieren**

Einen besonders anschaulichen Nutzen des im zweiten Abschnitt geschilderten Interferenzeffekts erhält man, wenn man einen Quantendraht mit speziell geformten Lichtfeldern bestrahlt. Einen Quantendraht kann man sich als Draht vorstellen, in dem sich die Elektronen nur entlang einer Richtung bewegen können. Dies ist vergleichbar mit Wasser in einem Schlauch: Es kann dem Verlauf des Schlauchs folgen, aber nicht die Ummantelung durchdringen. Allerdings sind im Nanodraht die Größenverhältnisse natürlich viel kleiner. Regt man mit einem nicht speziell geformten Laserstrahl Elektronen in der Mitte des Drahtes an, so bewegen sich die Elektronen von diesem Punkt weg. Da sie sich wie Materiewellen verhalten, überlagern sich die optisch angeregten Einzelwellen und deren Gesamtsumme ist ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Dieses Szenario ist in Abbildung 5 oben skizziert. Die Wahrscheinlichkeit ist über den

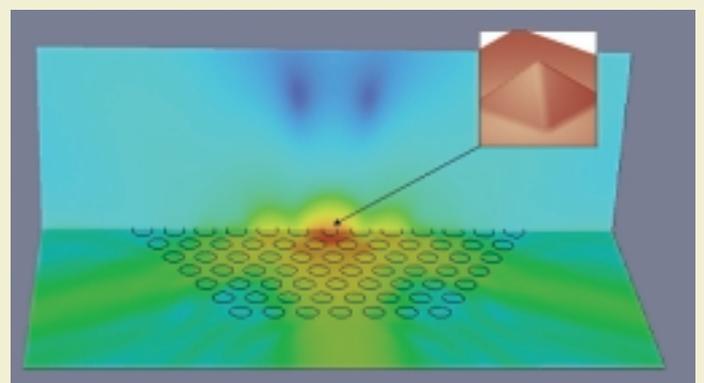


Abb. 4: Abgestrahltes Lichtfeld eines Halbleiter-Quantenpunktes, der sich im Zentrum eines optischen Resonators befindet.

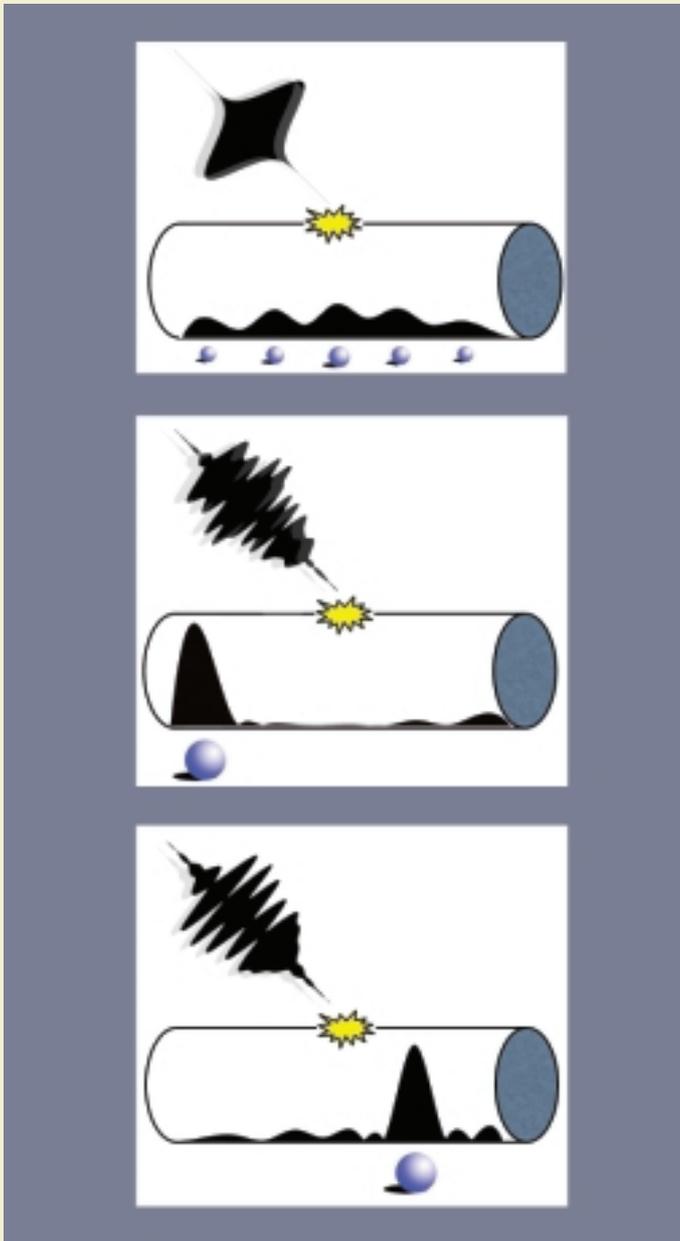


Abb. 5: Verschiedene Szenarien für die räumlich lokale optische Anregung eines Halbleiter-Quantendrahtes mit einem kurzen Lichtimpuls. Oben: Hat der Lichtimpuls keine besondere Struktur, so verteilen sich die in der Mitte angeregten Elektronen zu einem gewissen Zeitpunkt nach der Anregung über den ganzen Draht. Mitte und unten: Durch speziell geformte Lichtimpulse kann man die Elektronen zu einer vorgegebenen Zeit an einem beliebigen Ort konzentrieren.

ganzen Draht verteilt, wie die vielen blauen Kügelchen im Bild andeuten. Nun kann man sich aber eines Tricks bedienen: Ganz analog zu den Wasserwellen lassen sich auch die Materiewellen konstruktiv überlagern. Dies geschieht dadurch, dass ein kompliziert geformter Lichtimpuls auf den Draht geschickt wird, der die Wellen so erzeugt, dass sie später zu einem Maximum, also einem Wellenberg, zusammenlaufen. Wie in Abbildung 5 Mitte gezeigt, ist zu einem bestimmten Zeitpunkt praktisch die komplette Aufenthaltswahrscheinlichkeit an einer Position links im Draht konzentriert. Würde man nachprüfen, wo sich Elektronen befinden, würde man sie fast mit Sicherheit nur dort finden, wo die blaue Kugel eingezeichnet ist. Verwendet man einen ande-

ren Lichtimpuls, so liegt das Maximum der Aufenthaltswahrscheinlichkeit an einer Position weiter rechts im Draht (Abbildung 5 unten). Durch entsprechend konstruierte Eingangspulse können Elektronen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt an jede beliebige Position gebracht werden [7].

Obwohl das Prinzip der Interferenz und der damit verbundenen Steuerung von Elektronen recht einfach ist, steckt die Schwierigkeit des Verfahrens im Finden des geformten Lichtimpulses. Das liegt daran, dass es eine große Anzahl an möglichen Kombinationen für den Anregungspuls gibt. Er besteht nämlich aus vielen verschiedenen Farbkomponenten, deren Verhältnis auf eine bestimmte, sehr sensible Art gewichtet werden muss. Außerdem liegt zwischen den einzelnen Komponenten eine feste zeitliche Beziehung vor, die auf einer Zeitskala von wenigen Femtosekunden genau angeordnet werden müssen. Mathematisch ist das Finden des gewünschten Pulses gleichbedeutend mit einer Optimierung in einem hochdimensionalen Parameterraum, wobei für die Dimension  $n > 100$  gilt. So gesehen stellt die Methode an sich ein kompliziertes numerisches Problem dar.

Denkt man das Verfahren zur konstruktiven Interferenz von Elektronenwellen konsequent weiter, führt dies zu einer rein optischen Steuerung der Elektronenbewegung. Abbildung 6 zeigt eine entsprechende Rechnung. Auf der horizontalen x-Achse ist der „Ort“, also die Position innerhalb des Quantendrahtes aufgetragen. In Richtung der vertikalen y-Achse verläuft die „Zeit“, das heißt man kann hier die gesamte zeitliche Entwicklung der elektronischen Wahrscheinlichkeitsdichte verfolgen. Für verschiedene Anregungspulse lassen sich auch verschiedene Maxima in der Verteilung erzeugen. Dies entspricht anschaulich einem Transport von Elektronen von einem Ort zu einem anderen. Auf diese Art lassen sich eindrucksvoll die quantenmechanischen Eigenschaften von Elektronen, nämlich deren Wellencharakter, in Nanostrukturen demonstrieren und kontrollieren [7].

### Forschungstrends

Anhand von Beispielen aus der aktuellen Forschung wurden einige Aspekte zum Einfluss der Nanostrukturierung auf die optischen und elektronischen Eigenschaften vorgestellt. In diesem Bereich werden Computersimulationen schon seit einiger Zeit sehr erfolgreich verwendet, und zwar sowohl um grundlegende, als auch um anwendungsorientierte Fragestellungen zu untersuchen. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend zukünftig durch die Weiterentwicklung der Algorithmen und die Verbesserung der zur Verfügung stehenden Rechenleistung fortsetzen wird. Vielversprechende neue Methoden werden zurzeit in Zusammenarbeit mit den Arbeitsgruppen von Angela Kunothe (Mathematik) und Andrea Walther (Mathematik) entwickelt.

Ein hochaktuelles Forschungsthema im Bereich der Optoelektronik ist die Kontrolle einzelner Quantensysteme. Wenn alle Eigenschaften eines einzelnen Quantensystems gezielt gesteuert werden können, so wäre dies als Qubit in einem Quantencomputer einsetzbar. Hierzu wurde kürzlich in der Arbeitsgruppe von Artur Zrenner ein wesentlicher Fortschritt erzielt und gezeigt, dass man optische Qubits in Halbleiter-Quantenpunkten durch schnelle elektrische Signale steuern

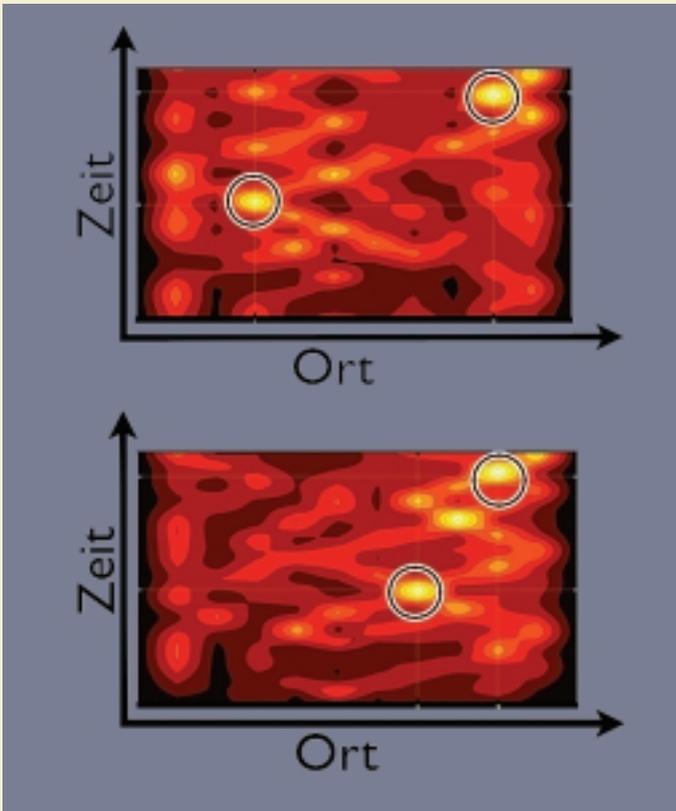


Abb. 6: Raum-zeitliche Dynamik optisch erzeugter Elektronenwellen in einem Halbleiter-Quantendraht. Durch spezielle Formung der anregenden Lichtimpulse ist es möglich, die Ausbreitung der Elektronen dahingehend zu beeinflussen, dass sie sich zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Orten (siehe Kreise) konzentrieren.

kann [8]. Dies eröffnet neue Perspektiven zur Verknüpfung optischer und elektronischer Datenverarbeitung. Da ein Quantencomputer natürlich nicht nur aus einem Qubit besteht, arbeiten weltweit viele Forschungsgruppen an der gezielten Kopplung von Quantensystemen. Hierbei ist zurzeit noch offen, welches System sich am Ende durchsetzen wird. Vielversprechend erscheinen in diesem Gebiet insbesondere Ansätze aus dem Bereich der Quantenoptik, bei der quantisierte Lichtteilchen (so genannte Photonen) gezielt miteinander gekoppelt werden. In Paderborn wird dieses moderne Forschungsthema auf der Basis integrierter optischer Komponenten seit kurzem in der Arbeitsgruppe der Leibnizpreisträgerin Christine Silberhorn untersucht.

**Literatur**

[1] H. HAUG, S. W. KOCH: „QUANTUM THEORY OF THE OPTICAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS“, 4TH ED., WORLD SCIENTIFIC, 2004.

[2] J. D. JOANNOPOULOS, S. G. JOHNSON, J. N. WINN, R. D. MEADE, „PHOTONIC CRYSTALS: MOLDING THE FLOW OF LIGHT“, 2ND ED., PRINCETON UNIVERSITY PRESS, 2008.

[3] K. A. PIEGDON, S. DECLAIR, J. FÖRSTNER, T. MEIER, H. MATTHIAS, M. URBANSKI, H.-S. KITZEROW, D. REUTER, A. D. WIECK, A. LORKE, C. MEIER: „TUNING QUANTUM-DOT BASED PHOTONIC DEVICES WITH LIQUID CRYSTALS“, OPTICS EXPRESS 18, 7946 (2010).

[4] A. ZRENNER: „QUBITS IM NANOKOSMOS – AUFBRUCH IN DIE WELT DER QUANTEN“, FORSCHUNGSFORUM PADERBORN, 9-2006, S.44–48.

[5] J. P. REITHMAIER, G. SĘK, A. LÖFFLER, C. HOFMANN, S. KUHN, S. REITZENSTEIN, L. V. KELDYSH, V. D. KULAKOVSKII, T. L. REINECKE, A. FORCHEL: „STRONG COUPLING IN A SINGLE QUANTUM DOT–SEMICONDUCTOR MICROCAVITY SYSTEM“, NATURE 432, 197 (2004).

[6] C. DINEEN, J. FÖRSTNER, A.R. ZAKHARIAN, J.V. MOLONEY, S.W. KOCH: „ELECTROMAGNETIC FIELD STRUCTURE AND NORMAL MODE COUPLING IN PHOTONIC CRYSTAL NANOCAVITIES“, OPTICS EXPRESS 13, 4980 (2005).

[7] M. REICHEL, T. MEIER: „SHAPING THE SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF THE ELECTRON DENSITY IN A HYBRID METAL-SEMICONDUCTOR NANOSTRUCTURE“, OPTICS LETTERS 34, 2900 (2009).

[8] S. MICHAELIS DE VASCONCELLOS, S. GORDON, M. BICHLER, T. MEIER, A. ZRENNER: „COHERENT CONTROL OF A SINGLE EXCITON QUBIT BY OPTOELECTRONIC MANIPULATION“, NATURE PHOTONICS, 4, 545 (2010).



**Dr. rer. nat. Jens Förstner** ist seit 2007 Leiter der Nachwuchsgruppe „Computational Nanophotonics“ im Rahmen des Emmy-Noether-Programmes der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Er beschäftigt sich mit der Wechselwirkung von Licht und Materie in Festkörpern, beispielsweise mit Vielteilchensystemen in komplexen photonischen Umgebungen, optischen Metamaterialien und Dekohärenz in Quantensystemen.



**Dr. rer. nat. Matthias Reichelt** arbeitet seit Ende 2007 als Akademischer Rat in der Arbeitsgruppe „Computational Optoelectronics and Photonics“ und untersucht dort die Licht-Materie-Wechselwirkung in Nanostrukturen. Zurzeit interessiert er sich für die Möglichkeit der Kontrolle der Elektronendynamik durch Licht mittels multidimensionaler Optimierungsprozesse.

**Kontakt**

**Prof. Dr. Torsten Meier**

**Fakultät für Naturwissenschaften**

**Department Physik**

**05251 60-2336**

**torsten.meier@upb.de**

# Prozessbezogene Energieeffizienz

## Die sauberste Energie ist die gesparte Energie

Prof. Dr.-Ing. habil. Eugeny Kenig

Vor dem aktuellen Hintergrund von Klimaschutz und Ressourcenschonung sind auch die Prozessindustrien (wie chemische, petrochemische, pharmazeutische Industrie) gezwungen, unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte zu produzieren. Das Ziel des minimalen Energieaufwands bei maximaler Produktivität stellt eine Herausforderung dar, die nicht nur innovativer Technologien sondern auch einer Steigerung der Effizienz bestehender Prozesse bedarf. Strategien zur Senkung des Energieaufwands durch Verfahrensumgestaltung oder -optimierung wurden entwickelt – Strategien, welche unter das Schlagwort der „Prozessintensivierung“ fallen. Der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik erforscht innovative Entwicklungen zur Prozessintensivierung und fasst darunter die Untersuchung und Optimierung energieintegrierter Apparate und Mikrostrukturapparate sowie energieeffizienter Wärmeaustauscher, Verdampfer und Kondensatoren.

Schauen Sie sich einmal mit offenen Augen in Ihrer Umgebung um. Sofern Sie sich nicht gerade inmitten von kanadischen Wäldern befinden, werden Sie überrascht sein, von welcher Vielzahl an industriellen Produkten Sie umgeben sind, bei denen Kenntnisse aus der modernen Verfahrenstechnik eine wesentliche Rolle gespielt haben. Von den Hustentropfen für Ihr Kind, über das Benzin für Ihren heutigen Weg zur Hochschule oder Arbeit, den Katalysator Ihres Wagens bis hin zum dampfenden Kaffee auf Ihrem Schreib-

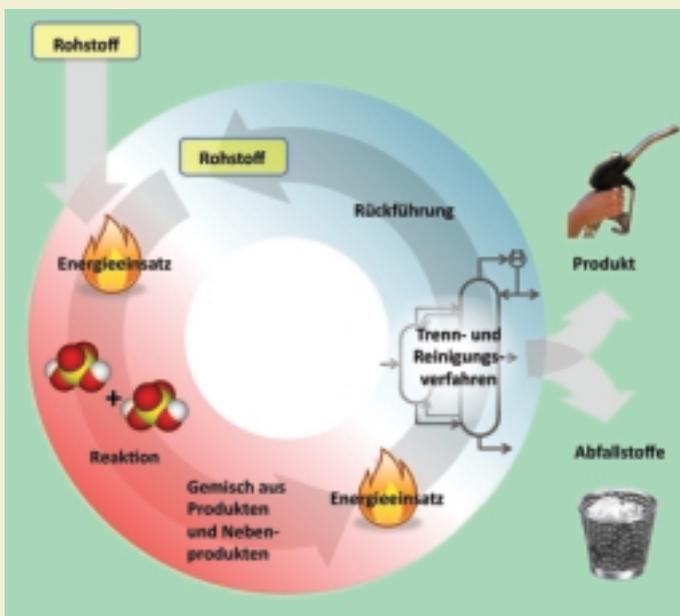


Abb. 1: Rohstoffkreislauf in einem Produktionsprozess.



**Prof. Dr.-Ing. habil. Eugeny Kenig**

leitet seit 2008 den Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik. Promotion 1985 an der Russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau. 1994 bis 1995 Alexander von Humboldt-Stipendiat an der Uni Dortmund. Danach tätig an den Universitäten Dortmund und Essen sowie bei der BASF. Habilitation 1999 sowie 2006 apl. Professor in Dortmund und 2007 Ruf nach Paderborn. Forschungsschwerpunkte sind integrierte Trennverfahren, Mikrotrennapparate und prozessbezogene Energieeffizienz.

tisch: Bei der qualitativ hochwertigen Herstellung ist immer die Verfahrenstechnik im Spiel. Sie umfasst alle chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse, bei denen Rohstoffe in Produkte umgewandelt werden. Petrochemische oder pharmazeutische Industrie, Lebensmittelherstellung, Energieerzeugung, Transport: Sie sind angewiesen auf die – meistens im Hintergrund funktionierenden – verfahrenstechnischen Prozesse.

Aufgrund der Besonderheiten unserer Zeit sind zudem die Anforderungen an die Qualität von Produkten stark ansteigend: Dies betrifft beispielsweise die Reinheit (von Medikamenten oder bei der Luftreinhaltung), hohe Konzentration und scharfe Trennungen (Lösemittelrückgewinnung, Elektronik, Additive) oder Selektivität (Vermeidung unerwünschter Nebenprodukte). Kaum ein Rohstoff mündet vollständig in einem Endprodukt, kaum ein Produktionsprozess geht ohne Neben- und Abfallprodukte vonstatten, welche ihrerseits weiterverarbeitet werden (siehe Abbildung 1). Produktionsprozesse erweisen sich somit nicht nur als äußerst komplex, sondern auch als energieintensiv. Das trifft besonders für thermische Trennverfahren zu: Gerade die Destillation macht über drei Prozent des weltweiten Energieverbrauchs aus – ein immenser Anteil, bedenkt man, dass dies nur ein einziges Verfahren unter einer Vielzahl darstellt.

Fortschritte in der Informationsverarbeitung und der numerischen Mathematik, modernste Technologien und Trennverfahren – sie alle eröffnen neue Möglichkeiten zur Lösung von Problemen unserer Zeit. Diesen Herausforderungen stellen sich die Wissenschaftler am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik: Unter dem Stichwort „Prozessintensivierung“ forschen sie an der Weiterentwicklung von prozesstechnischen Methoden zur Behandlung von Flüssigkeiten und

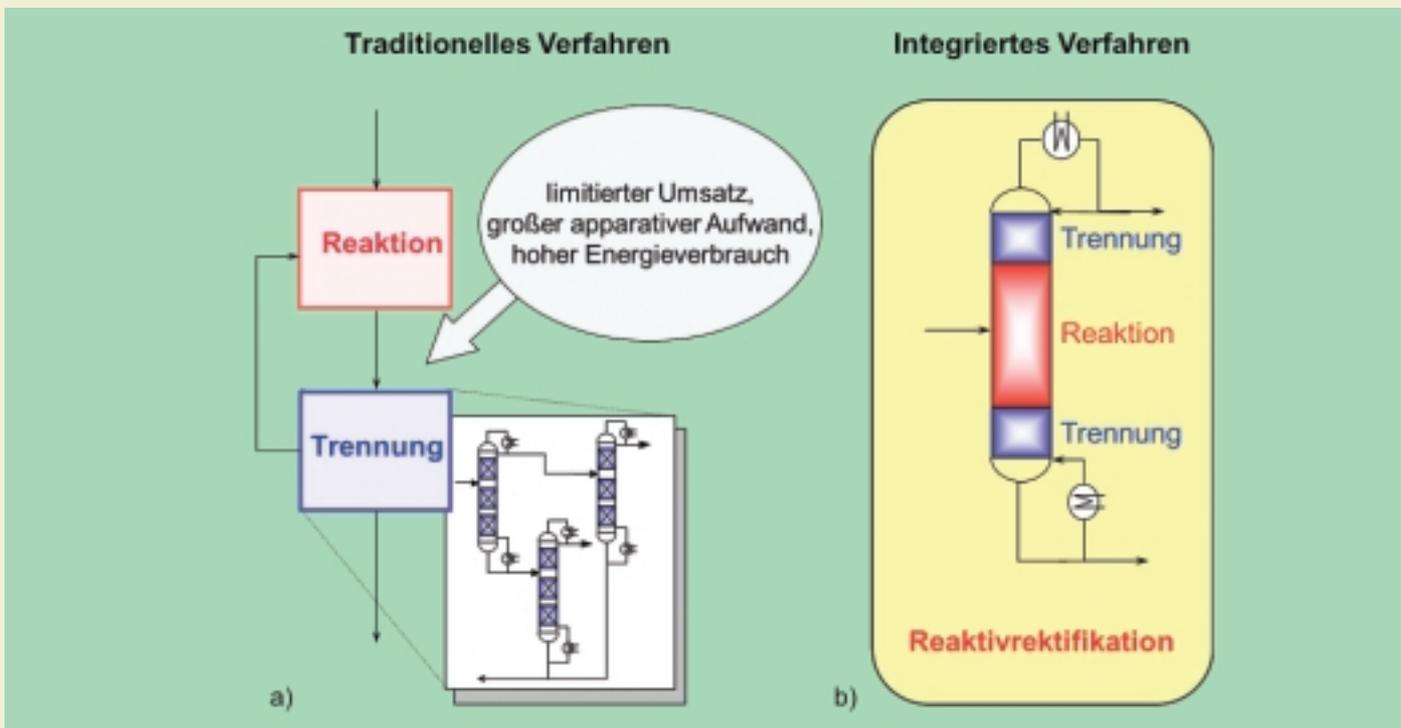


Abb. 2: Traditionelles (a) und integriertes (b) Verfahren.

Gasen – dies alles unter den Prämissen von Produktqualität und Energieeinsparung.

### Intelligent integrieren

Seit Jahren ist bei den Prozessindustrien ein wachsendes Interesse an Verfahren zu verzeichnen, welche chemische Reaktion und Stofftrennung zielgerichtet in einem integrierten Prozess verbinden. Ein gutes konkretes Beispiel, bei dem verschiedene Funktionalitäten in einem Apparat verbunden werden, stellt die so genannte Reaktivrektifikation dar. In herkömmlichen Anlagen erfolgt die Reaktion in einem Reaktor und die anschließende Stofftrennung in hintereinander geschalteten Trenneinheiten (siehe Abbildung 2a).

Die Leistungsschwäche konventioneller Syntheseprozesse resultiert aus der Tatsache, dass die Reaktion, in der die gewünschten chemischen Stoffe entstehen, nur selten vollständig und trennscharf erfolgt. Aus diesem Grund enthält das Reaktionsprodukt Restmengen an Ausgangsstoffen sowie Neben- und Zwischenprodukte. Diese müssen von den kommerziellen Endprodukten getrennt und – soweit möglich – dem Reaktor wieder zugeführt werden. Eine solche nachfolgende Trennung erfolgt generell in mehreren seriell geschalteten Rektifikationskolonnen.

Dagegen reagieren bei der Reaktivrektifikation die Edukte in derselben Kolonne, in der das entstandene Produktgemisch aus nicht abreagierten Edukten und Produkten getrennt werden soll (siehe Abbildung 2b). Häufig wird dazu ein Katalysator (entweder flüssig oder fest) benötigt. Im Fall des festen Katalysators ist es möglich, klar definierte Reaktions- und Trennzonen zu gestalten und somit die Reaktions- und Trennleistung zu optimieren [1,2].

Die Reaktivrektifikation kombiniert somit die zwei Prozesse

durch Einsatz eines Reaktors im Inneren der Rektifikationskolonne. Während das Produkt stets der Kolonne entnommen wird, verbleiben die Edukte und die entstandenen Nebenprodukte im Kreislauf innerhalb der Kolonne. Auf diese Weise können die daraus resultierenden Reaktionseinschränkungen umgangen und dadurch eine deutlich bessere Trennschärfe, Ausbeute sowie höhere Reaktionsumsätze erreicht werden.

Derzeit gelangt die Reaktivrektifikation vor allem im Bereich der Acetat-Technologie, Alkylierung und bei der Herstellung von Treibstoffadditiven zum Einsatz. Am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik forschte man zu unterschiedlichen Aspekten der Reaktivrektifikation: So wurden zum Beispiel Apparat- und Einbautendesign, Prozessgestaltung und -optimierung sowie industrielle Case Studies unter die Lupe genommen. Eine Reihe von industriellen Kooperationsprojekten – oftmals in koordinierender Funktion – wurde durchgeführt, und diese ergiebige Zusammenarbeit mit Weltmarktführern

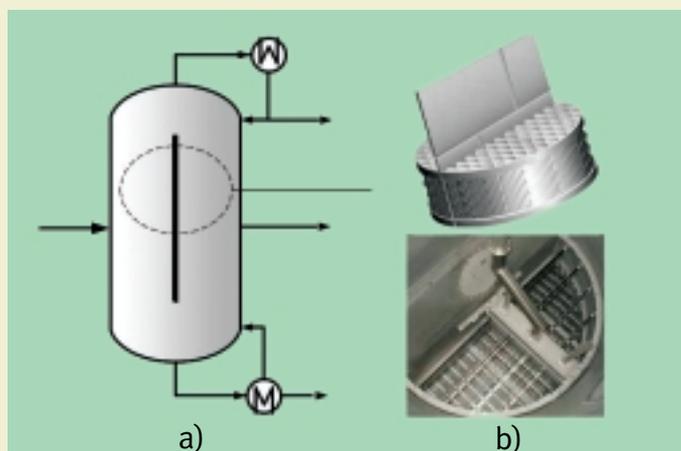


Abb. 3: Trennwandkolonne: Gesamtdarstellung (a) und geteilter Mittelabschnitt (b): Schema (oben) und Foto inkl. Flüssigkeitsverteiler (unten) [4].

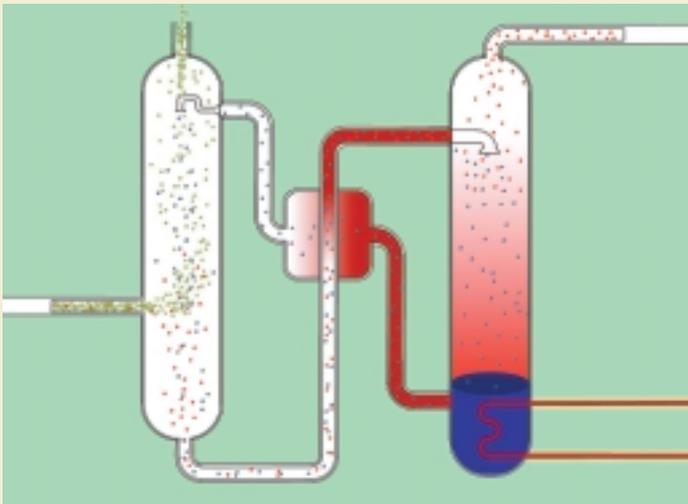


Abb. 4: Absorptions-/Desorptionskreislauf.

und hochrangigen Unternehmen (z. B. BASF, Bayer, BP, ENI, Sulzer) brachte die europäische Rektifikationslandschaft prägend voran [2,3].

Neben der Integration von verschiedenen Funktionalitäten in einem Apparat wie bei der Reaktivrektifikation („funktionale Integration“) gibt es auch eine andere Form der Integration, bei der parallel und/oder seriell durchgeführte Trennoperationen in einem Apparat kombiniert werden („apparative Integration“). Serielle Verschaltungen von Kolonnen finden sich häufig bei der Trennung von Mehrstoffgemischen in drei oder mehr Fraktionen.

Eine Alternative dazu stellt die innovative Technologie dar, bei der eine vertikale Trennwand im mittleren Abschnitt einer Seitenstromkolonne platziert wird (siehe Abbildung 3) [5]. In diesem Fall werden zwei Rektifikationskolonnen zusammengebunden. In dieser so genannten Trennwandkolonne (TWK) wird ungünstige Rückvermischung der Komponenten weitgehend beseitigt und dadurch der Wirkungsgrad der Kolonne gesteigert. Die TWK-Technologie weist erhebliche Energieeinsparungen (über 50 Prozent) gegenüber den konventionellen Rektifikationsanlagen aus [6]. Darüber

hinaus sind signifikante Investitionskostenreduktionen, verringerter Platzbedarf, erhöhte Flexibilität in der Prozessführung und geringere thermische Belastung bei temperaturempfindlichen Stoffen als weitere Benefits zu nennen.

Trennwandkolonnen stellen eine äußerst effektive Methode zur vollständigen Trennung von Mehrstoffgemischen dar und halten aus diesem Grund zunehmend Einzug in die industrielle Anwendung.

Ein noch höherer Integrationsgrad wird erreicht, wenn sowohl funktionale als auch apparative Integration gleichzeitig verwendet werden: Erweitert man beispielsweise den Einsatzbereich von Trennwandkolonnen auf reaktive Systeme, um die Vorteile der Reaktivdestillation mit den Vorzügen der Trennwandkolonne zu kombinieren, so gelangt man zum Konzept der so genannten reaktiven Trennwandkolonne (RTWK).

Durch einen sehr hohen Integrationsgrad ergibt sich ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Phänomene. Dadurch stellen sie im Hinblick auf Modellierung und Auslegung eine große Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurden für dieses integrierte Verfahren am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik spezielle, kinetisch-basierte (Rate-based) Modellierungsmethoden entwickelt [7] und anhand experimenteller Daten des Kooperationspartners BASF SE validiert [8]. Diese Methoden können nun für Design- und Optimierungszwecke benutzt werden.

### Treibhausgase reduzieren

Zu den modernen Anforderungen an Produktionsprozesse zählen auch dringende ökologische Notwendigkeiten: CO<sub>2</sub> als anthropogenes Treibhausgas gilt als der Hauptverursacher der Klimaveränderung. Die Verbrennung von fossilen Brennstoffen zur Energieerzeugung trug im Jahr 2007 42 Prozent zur globalen Emissionen an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) bei. Bis zum Jahr 2050 strebt die Europäische Kommission eine Reduzierung globaler Treibhausgasemissionen um 50 Prozent an; dabei gilt die Abscheidung und geologische

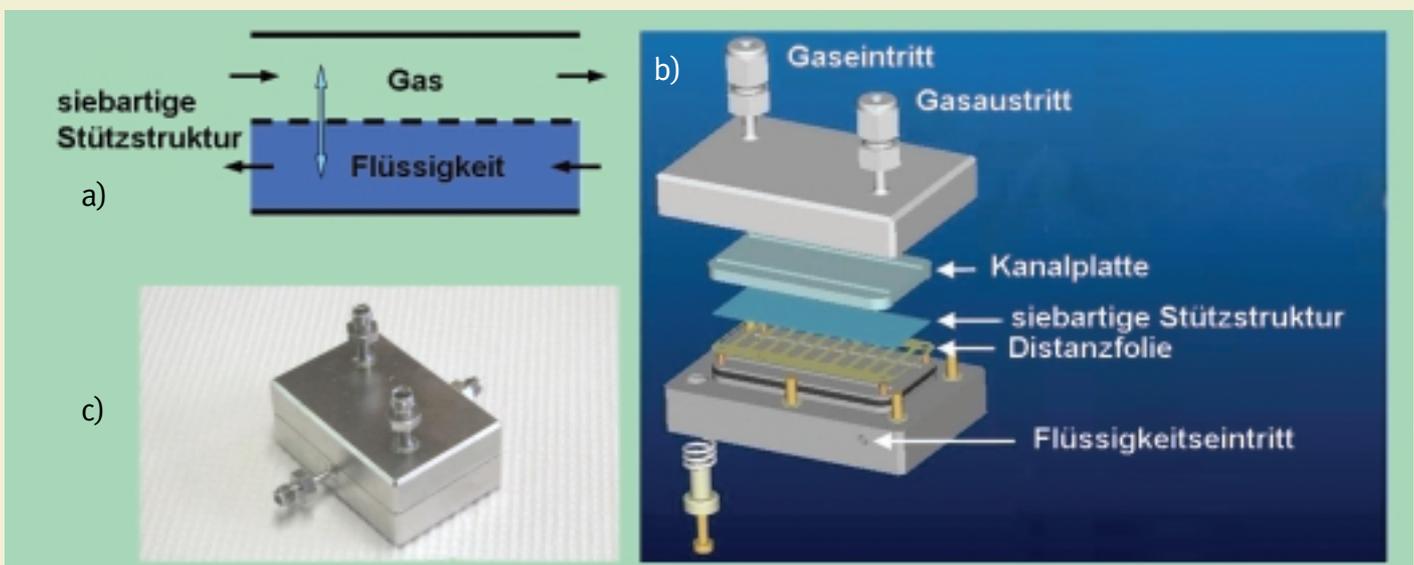


Abb. 5: Schematische Darstellung der Phasenkontaktierung entlang eines Gas-Flüssigkeitskanalpaares (a) und des gesamten Mikrotrennapparates (b) sowie Foto des Mikrotrennapparates (c).

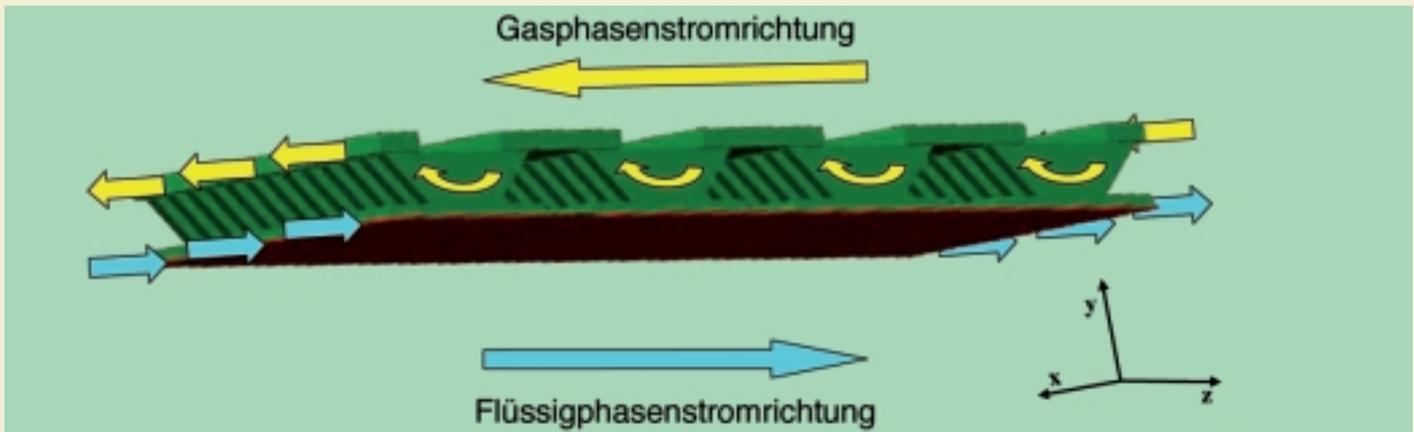


Abb. 6: Strömungsführung im Mikrodesorber.

Speicherung von  $\text{CO}_2$  als wichtige Technologie [9]. Als ein weit verbreitetes Verfahren zur großtechnischen Abscheidung des  $\text{CO}_2$  aus Rauchgasen dient der in Abbildung 4 dargestellte Kreislaufprozess aus einer Aminwäsche (reaktive Absorption) und anschließender Regeneration des Lösemittels (Desorption). In diesem Prozess nimmt die als Waschlösung eingesetzte wässrige Aminlösung das  $\text{CO}_2$  durch chemische Bindung auf, wird anschließend durch Temperaturerhöhung regeneriert und kann erneut zur Absorption von  $\text{CO}_2$  eingesetzt werden. Um die thermische Energie des regenerierten Lösemittels zu nutzen (Wärmeintegration), wird diese zur Erwärmung des beladenen Lösemittels genutzt. Das bei der Regeneration frei werdende  $\text{CO}_2$  kann nun komprimiert und geologisch gespeichert oder industriell weiterverwendet werden (Kältemittel, Kohlensäure, Lösungsmittel). Der Vorteil einer Aminwäsche gegenüber einer nicht reaktiven (physikalischen) Absorption liegt darin, dass dank des höheren Aufnahmevermögens deutlich geringere Lösungsmittelmengen benötigt werden. Aus dem Vorteil ergibt sich hingegen der Nachteil, dass zur Lösung der chemischen Bindung zwischen Amin und  $\text{CO}_2$  mehr Energie benötigt wird als zum Austreiben von physikalisch gelöstem  $\text{CO}_2$ .

Zur energieeffizienten Integration der  $\text{CO}_2$ -Abscheidung in den Kraftwerksprozess wird die zur Temperaturerhöhung der Aminlösung erforderliche Energie (Wärme) durch den Niederdruckdampf aus dem Wasser-Dampf-Kreislauf des Kraftwerks bereitgestellt. Jedoch fällt dadurch der Kraftwerkswirkungsgrad aufgrund des hohen Energiebedarfs der Regeneration um bis zu 13 Prozentpunkte [9]. Um den Energiebedarf zu senken, ist es nötig, Lösemittel zu finden, welche mit geringem Energieaufwand regeneriert werden können, gleichzeitig jedoch über hohe Kapazität, Selektivität und Reaktionsgeschwindigkeit verfügen.

Am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik ist man imstande, die für die Absorption vorgeschlagenen Lösemittel, also solche mit hoher Kapazität und hohen Reaktionsgeschwindigkeiten, auf ihre Einsatzfähigkeit im Kreislaufprozess zu testen. Dazu werden mithilfe der kommerziellen Software Aspen Custom Modeler® (ACM) Rate-based Simulationen des Prozesses durchgeführt [1,10]. Das Rate-based Modell berücksichtigt die Kinetik des Stoff- und Wärmetransports sowie der chemischen Reaktionen direkt. Dies ist vor allem

bei schnellen Reaktionen wichtig [11]. Mithilfe dieser Simulationen kann der Energie- und Lösemittelverbrauch ohne aufwändige experimentelle Untersuchungen bestimmt werden. Über Kooperationen mit Forschern aus Indien (Universität Mumbai) gelingt es zudem, neue Lösungsmöglichkeiten zu testen [12].

#### Anlagen miniaturisieren

Eines der Forschungsziele am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik ist es, Strategien zu entwickeln, welche eine drastische Effizienzsteigerung von Prozessen bewirken und zudem sparsamer mit den eingesetzten Rohstoffen und Energien umgehen. Im Fokus steht dabei die Mikroverfahrenstechnik, die gegenüber konventionellen Apparaten entscheidende Vorteile aufweist. So können eine deutlich höhere Effektivität bezüglich der Produktausbeute und eine effizientere Nutzung von Rohstoffen und Energie erzielt werden. Realisiert wird das Ganze dadurch, dass verfahrenstechnische Produktionsprozesse in Apparaten im Mikromaßstab durchgeführt werden. Diese Apparate weisen eine Mikrostruktur auf, zu der insbesondere Mikrokanäle zählen.

Um die Vorgänge in solchen Apparaten besser verstehen und damit eine Optimierung vornehmen zu können, werden am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik theoretische Untersuchungen solcher Apparate durchgeführt, wobei man sich der Methode der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD) bedient. Diese Methode wird mithilfe von speziellen Computerprogrammen ausgeführt, welche eine Berechnung von z. B. Geschwindigkeits-, Konzentrations- oder Temperaturprofilen ermöglichen. Die Herausforderung solcher Untersuchungen liegt vor allem darin, miteinander gekoppelte Vorgänge wie Stofftransport und Wärmetransport im Mikromaßstab zu beschreiben.

Ein Beispiel für einen vom Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik untersuchten Mikrotrennapparat ist der in Abbildung 5 dargestellte Mikrodesorber. Seine Apparatestruktur erlaubt die Kontaktierung eines Gas- und eines Flüssigkeitsstroms, wodurch Schadstoffe aus dem Gas in die Flüssigkeit übergeführt werden können. Somit ist eine äußerst effiziente Reinigung des Gases möglich.

Die Apparatestruktur besteht im Wesentlichen aus einer Mikrokanalplatte, einer siebartigen Stützstruktur sowie

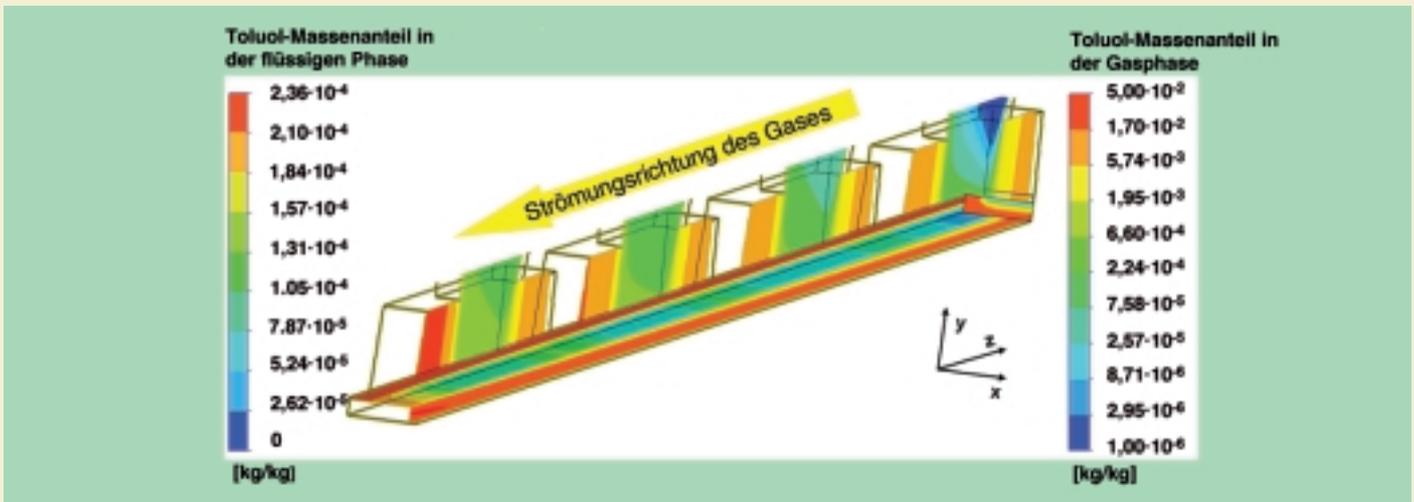


Abb. 7: Toluolkonzentrationsprofil in der Gas- und in der flüssigen Phase entlang einer Flüssigkeitskanal-Gaskanal-Anordnung.

einer Distanzfolie, die auf der Bodenplatte des Apparates fixiert ist. Durch letztere entstehen auf der Bodenplatte kanalartige Hohlräume. Während nun die Mikrokanalplatte von einem Gas durchströmt wird, durchfließt eine Flüssigkeit die Hohlräume der Bodenplatte. Die siebartige Stützstruktur dient zur Stabilisierung der Gas- und Flüssigkeitsströme und verhindert somit ihre Vermischung. Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung der Stromführung. Hierbei handelt es sich um einen Hohlraum der Bodenplatten (rot) mit angrenzenden Mikrokanälen (grün).

Um die Vorgänge in diesem Apparat verstehen zu können, wurden vom Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik theoretische Untersuchungen mittels CFD durchgeführt. Dabei wurden Konzentrationsverteilungen eines mit Toluol beladenen Gases in Abhängigkeit von unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten untersucht. Toluol ist ein aromatischer Kohlenwasserstoff, der häufig als Lösungsmittel eingesetzt wird und der gesundheitsschädigende Eigenschaften besitzt. Abbildung 7 zeigt die Konzentrationsverläufe von Toluol in der Gasphase und in der Flüssigkeit. Durch die CFD-basierten Simulationen konnten Zusammenhänge zwischen den Strömungsverläufen des Gases und der Flüssigkeit sowie der Desorptionsgrad von Toluol ermittelt werden. Zudem wurden kritische Bereiche, die sich negativ auf den Desorptionsgrad auswirken, lokalisiert, um anschließend Optimierungsansätze zu erarbeiten, welche zu einer erheblichen Steigerung des Desorptionsgrades führten [13].

Weitere Untersuchungen auf dem Gebiet der Mikrotrenntechnik widmen sich einem Mikrofallfilmabsorber. Die Besonderheit dieses Apparates gegenüber konventionellen Apparaten liegt in der Generierung von sehr feinen Flüssigkeitsfilmen. Dies ermöglicht eine Erhöhung der Effektivität eines Prozesses. Im Rahmen eines großangelegten EU-Projektes „F<sup>3</sup> Factory“ erforschen die Wissenschaftler des Lehrstuhls für Fluidverfahrenstechnik die Vorgänge in diesem Apparat für industrierelevante Prozesse. F<sup>3</sup> Factory steht für „Flexible, Fast and Future Factory“ – mit dem erklärten Ziel, den Weg zu einer schnelleren, effektiveren und flexibleren Fabrik zu ebnen, welche vor allem im Vergleich zu derzeit noch herrschenden Standards deutlich ressourcenschonender arbeitet.

### Wärmeübertragung optimieren

Ein weiterer Aspekt der Arbeit am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik befasst sich mit der Optimierung des Energieverbrauchs zur Verbesserung der Wärmeübertragung. In der Energietechnik versteht man unter Kreisprozessen energie-technische Prozesse, bei denen das Arbeitsmedium periodisch seinen Zustand ändert, z. B. bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit, Heizen und Kühlen durch Aufwenden von Arbeit. Die Effizienz dieser Kreisprozesse hängt entscheidend von der Verdampfungskinetik des Arbeitsstoffes ab. Zur Intensivierung dieser Kinetik werden Heizflächen in der Regel mit einer integrierten Struktur versehen oder mit einer porösen Schicht überzogen. Die zur Fertigung solcher Strukturen eingesetzten Verfahren sind aufwändig, zudem können die für die Verdampfung günstigen Formen und Abmessungen der Strukturelemente nur bedingt erreicht werden. Die mit Strukturen versehenen Heizflächen steigern den Wärmeübergang beim Sieden durch Erhöhung der Blasendichte und/oder Vergrößerung der Länge der Dreiphasenlinie Wand-Flüssigkeit-Dampf. Bei der vom Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik entwickelten Mikrostruktur [14] wirken die beiden Mechanismen simultan. Die Elemente dieser Mikrostruktur weisen die Form von Pins auf. Der Pindurchmesser kann zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $25 \mu\text{m}$ , die Pindichte bis zu  $10^9$  Elemente je Quadratzentimeter variiert werden. Der Neigungswinkel der Pins in Bezug auf die Grundfläche stellt einen weiteren Parameter dar.

Die Mikrostruktur liefert eine große Anzahl von Blasenzentren, die zwischen den Pins geformt und aktiviert werden. Die Pins dringen in die wachsende Dampfblase hinein und bilden dadurch eine extrem lange Dreiphasenlinie. Die Haupteigenschaft solcher Strukturen liegt in ihrer Wirkung gegen die Wandüberhitzung, so dass die Siedefläche in einem großen Bereich der Wärmestromdichte nahezu isotherm bleibt [15].

Ein ausgesprochen interessantes Phänomen dieser Strukturen ist die kettenförmige Anordnung wachsender Dampfblasen (Abbildung 8). Die benachbarten Blasen kommunizieren miteinander über Dampfkanäle, mit der Folge der oben erwähnten, extrem langen Dreiphasenlinie. Die Mikrostruk-

tur verfügt offenbar über das Vermögen einer Selbstorganisation und verhält sich im Einklang mit der Regelungstheorie; sie organisiert sich gegen die thermische Belastung über eine Vergrößerung der Dreiphasenlinie. Zum Tragen kommen diese Erkenntnisse beispielsweise in der Kältetechnik und bei Wärmepumpen.

### Ausblick

Die Ziele der Forschungsaktivitäten des Lehrstuhls für Fluidverfahrenstechnik liegen insgesamt auf der Entwicklung und Optimierung verschiedener Prozesse mit dem Ziel der Energieeinsparung durch Optimierung energieaufwändiger Verfahren und Apparate. Unter dem Vorzeichen der Verknappung fossiler Brennstoffe ist der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik auch auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien aktiv. Derzeit werden Möglichkeiten zur Aufreinigung des bei der Biogaserzeugung entstehenden Gärrestes untersucht.

Unter dem Motto Prozessintensivierung sucht der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik mit multilateralen Ansätzen nach Lösungen: Es gilt, mehrere Verfahrensschritte in eine Einheit intelligent zu integrieren (Reaktivrektifikation), die Effizienz eines einzelnen Verfahrens durch maßgeschneiderte Lösungsmittel oder durch signifikante Verkleinerung der Apparatestruktur zu steigern (Reaktivabsorption, Mikroverfahrenstechnik) und nicht zuletzt die Wärmeübertragung insbesondere von Verdampfer und Kondensatoren zu intensivieren.

Darüber hinaus gelten Energieversorgung und -nutzung als ein zentrales ingenieurwissenschaftliches Thema: So strebt der Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik auf interdisziplinärer Ebene eine Erweiterung der universitären Aktivitäten insbesondere im Raum OWL an. Vor diesem Hintergrund wurde das Kompetenzzentrum für Energietechnik (KET) ins Leben gerufen – eine gemeinsame fachübergreifende Organisation von je zwei Lehrstühlen aus den Bereichen Elektrotechnik und Maschinenbau. Im Fokus dieser Kooperation

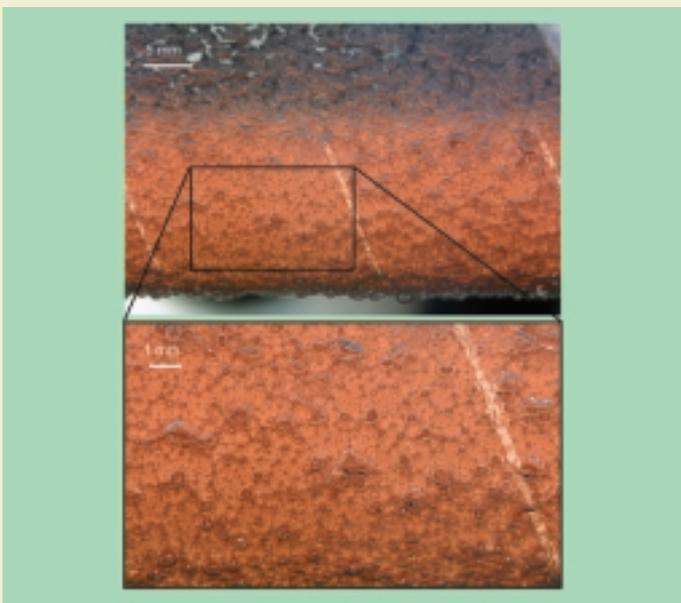


Abb. 8: Mikrostruktur mit Blasenketten beim Sieden des Kältemittels, R134a (Druck 7 bar, Wärmestromdichte 57 kW/m<sup>2</sup>).

stehen innovative Energieerzeugung sowie effiziente und umweltfreundliche Energienutzung.

### Literatur

- [1] KENIG, E.Y., GÓRAK, A., BART, H.-J., REACTIVE SEPARATIONS IN FLUID SYSTEMS. IN: RE-ENGINEERING THE CHEMICAL PROCESSING PLANT (EDS. STANKIEWICZ, A. UND MOULIJN, J.A.), NEW YORK: MARCEL DEKKER INC, 2003.
- [2] KENIG, E.Y., GÓRAK, A., MODELING OF REACTIVE DISTILLATION. IN: MODELING OF PROCESS INTENSIFICATION (ED. KEIL, F.), WEINHEIM: WILEY-VCH, 2007.
- [3] KENIG, E.Y., PYHÄLÄCHTI, A., JAKOBSSON, K., GÓRAK, A., AITAMAA, J., SUNDMACHER, K., AIChE JOURNAL 50 (2004), 322–342.
- [4] FIRMENKATALOG JULIUS MONTZ GMBH, ABSCHNITT: MONTZ TRENNWAND-KOLONNEN, 2008, [HTTP://WWW.MONTZ.DE/SITES/SERVICES/DOWNLOAD.FR.HTML](http://www.montz.de/sites/services/download.fr.html).
- [5] KAIBEL, G., CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY 10 (1987), 92–98.
- [6] DEJANOVIC, I., MATIJASEVIC, L., OLUJIC, Z. CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING 49 (2010), 559–580.
- [7] MUELLER, I., KENIG, E.Y., INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH 46 (2007), 3709–3719.
- [8] GROSSMANN, C., KENIG, E.Y., CIT PLUS 5 (2007), 38–41.
- [9] SCHÄFFER, A., BRECHTEL, K., SCHEFFKNECHT, G., VGB POWERTECH 90 (2010), 66–71.
- [10] KENIG, E.Y., GÓRAK, A., REACTIVE ABSORPTION. IN: INTEGRATED CHEMICAL PROCESSES (EDS. SUNDMACHER, K., KIENLE, A. UND SEIDEL-MORGENSTERN, A.), WEINHEIM: WILEY-VCH, 2005.
- [11] KENIG, E.Y., SEFERLIS, P., MODELING REACTIVE ABSORPTION. CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS 105/1 (2009), 65–71.
- [12] KONDURU, P.B., VAIDYA, P.D., KENIG, E.Y., ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 44 (2010), 2138–2143.
- [13] CHASANIS, P., KERN, J., ZECIROVIC, R., GRUENEWALD, M., KENIG, E.Y., PROC. 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CATALYSIS IN MULTIPHASE REACTORS. MONTREAL, CANADA, AUGUST 2009.
- [14] MITROVIC J., USTINOV A., JOURNAL OF ENHANCED HEAT TRANSFER 13 (2006), 1–18.
- [15] USTINOV A., MITROVIC J., PROC. 14TH INT. HEAT AND MASS TRANSFER CONFERENCE, WASHINGTON D.C., USA, AUGUST 2010.

#### Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eugeny Kenig

Fakultät für Maschinenbau

Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik

05251 60-2408

[eugeny.kenig@upb.de](mailto:eugeny.kenig@upb.de)

# Der Kneeter

## Ein innovativer chemischer Hochviskos-Reaktor

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Warnecke, M. Sc. Oliver Seck, B. Sc. Marko Gemmerich, Dr.-Ing. Christian Hennig

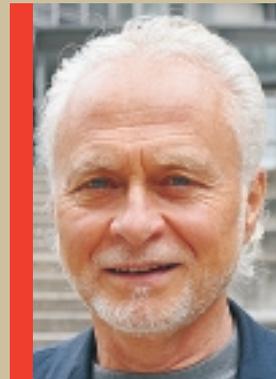
Viele ausgereifte chemische Prozesse werden inzwischen auch in nicht hochindustrialisierten Ländern wirtschaftlich durchgeführt. Die Umweltauflagen innerhalb der EU setzen anspruchsvolle Standards. Rohstoffe und Energieressourcen verknappen und verteuern sich. Die Herausforderungen für die chemische Industrie bestehen unter diesen Voraussetzungen in wettbewerbsfähigen Produktionskosten, einem schonenden Umgang mit den Ressourcen und der Sicherheit der Apparate und Prozesse (Dr. Helmut Mothes, Direktor BTS, Leverkusen).

Den notwendigen An Schub, sich diesen Herausforderungen zu stellen, leistet die Europäische Union durch ihr Fördergroßprojekt „F<sup>3</sup> Factory“, in dem führende europäische Großunternehmen der Chemie über alle Wettbewerbsgrenzen hinweg gemeinsam mit Forschungsinstituten und Hochschulen an neuen Technologien und Konzepten für die flexible und rohstoffsparende Produktion der Zukunft arbeiten.<sup>[1]</sup> F<sup>3</sup> steht für „Flexible, Fast and Future“. Es gilt, den Prototyp der Fabrik der Zukunft mit Methoden der Prozessintensivierung zu entwickeln und zu demonstrieren, so auch in einem der bedeutendsten Wachstumszweige der Chemischen Industrie: der Polymersparte.

Polymere Materialien – allgemein Kunststoffe genannt – haben während der letzten Jahrzehnte eine stürmische Entwicklung genommen. Ihre Anwendung ist überdurchschnittlich gewachsen durch die Substitution traditioneller Werkstoffe. Im Verbund mit diesen – Metallen, Glas oder Holz/Papier – wird den Polymeren das größte Innovationspotenzial zugesprochen. Richtungsweisende Innovationen werden erwartet, besonders auf dem Gebiet der polymeren Hochleistungswerkstoffe, im Bereich der polymeren Nano- und Biotechnologie sowie bei der Anwendung von Polymeren in der Medizin.

### Apparatetechnik in der Hochviskos-Polymersparte

Bei der technischen Synthese, der Aufarbeitung, der Eigenschaftsmodifikation und der Verarbeitung polymerer Materialien treten sehr hohe Materialviskositäten (im Extremfall bis zur Erstarrung) auf. Diese Zähflüssigkeit stellt eine hohe Anforderung an die Apparatefestigkeit und -handhabung. Daher wird vor allem unter Zusatz von Lösemitteln und/oder im Chargenbetrieb, d. h. diskontinuierlich (Batch), gearbeitet. Der Chargenbetrieb ist weniger wirtschaftlich als die kontinuierliche Fahrweise und die störenden Lösemittel im Endprodukt müssen in zusätzlichen Prozessschritten mit



**Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Warnecke** ist seit 1998 Hochschullehrer für das Fachgebiet Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik. Er ist Gründungsmitglied der Zentralen Wissenschaftlichen Einrichtung „Institut für Polymere Materialien und Prozesse (PMP)“ und seit 2003 Dekan der Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Paderborn.

hohem Energie- und Technikaufwand entfernt werden. Ohne Lösemittel (d. h. in Masse) können derartige Prozesse effizienter durchgeführt werden. Um hierbei die zähe Flüssigkeit/Schmelze zu handhaben, sind entsprechende Hochviskosmaschinen erforderlich. Diese sollten möglichst kontinuierlich betreibbar sein und alle wesentlichen Prozessschritte in einer Apparatestufe integrieren.

In Tabelle 1 ist das Anforderungsprofil an Apparate für Hochviskos-Prozesse und das entsprechende Eignungsprofil verschiedener Apparate vergleichend dargestellt.

Der in der Polymersparte als kontinuierlicher Apparat etablierte Extruder entspricht diesem Anforderungsprofil in vielen Punkten, jedoch nicht umfassend genug. Das Wirkprinzip des Extruders beruht auf der Zwangsförderung durch die Extruderschnecke(n), so dass Durchsatz und Verweilzeit unmittelbar mit der Schneckendrehzahl verknüpft sind.

| Prozess-Anforderungsprofil   | Apparate-Eignungsprofil |               |               |
|------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
|                              | Extruder                | Batch-Kneeter | Konti-Kneeter |
| Hochviskos-Prozessführung    | +                       | +             | +/-           |
| Hohe Verweilzeit             | -                       | +             | +             |
| Kontinuierlicher Betrieb     | +                       | -             | +             |
| Hohe Stofftransferate        | +                       | -             | +             |
| Einstellbarer Füllgrad       | -                       | +             | +             |
| Selbstreinigung              | +                       | -             | +             |
| Effiziente Temperaturführung | -                       | -             | +             |
| Einmischen von Feststoffen   | 0                       | +             | +             |
| Apparateverständnis          | +                       | 0             | -             |

Tabelle 1: Anforderungen an und Eignungsprofile von Hochviskos-Apparaten.



Abb. 1: Mischwerkzeug eines Kneters.

Prozesse, die aufgrund der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit eine deutlich längere Verweilzeit als fünf bis zehn Minuten erfordern, sind nicht wirtschaftlich mit dem Extruder zu realisieren. Darüber hinaus kann durch den hohen spezifischen mechanischen Energieeintrag die Temperatur des Produkts längs des Extruders erheblich ansteigen, verbunden mit einer möglichen kritischen Überhitzung. Eine weitere Begrenzung der Wirtschaftlichkeit von Extrudern ist beim homogenen Einmischen von Füllstoffen und Additiven zur gezielten Einstellung der Polymereigenschaften, dem Compoundieren, gegeben. Eine im Vergleich zu flüssigen Schmelzen geringe Schüttdichte der einzumischenden Partikelmenge erfordert ein großes Aufnahmevervolumen, das beim Extruder nicht gegeben ist.

Der Knetter hat aufgrund der Entkopplung von Drehzahl und Durchsatz dort, wo der Extruder Einschränkungen aufzeigt, gute Einsatzmöglichkeiten: bei langen Verweilzeiten, bei der gezielten Temperaturführung und beim Betrieb mit Teilfüllung (insbesondere zur Entgasung).<sup>[2]</sup> Dieses hohe Potenzial des Kneters für neue Prozesse und Anwendungen wird auch durch mannigfaltige Patentanmeldungen belegt. Jedoch wird der Knetter derzeit vom Apparatebau nur in sehr begrenzter Auswahl angeboten und von der Chemischen Industrie nur zurückhaltend angenommen. Diese Diskrepanz lässt sich u. a. darauf zurückführen, dass Patente zwar den Anspruch auf den Schutz einer grundsätzlichen Idee belegen, aber im Allgemeinen ein fundiertes Wissen zu ihrer effizienten Realisierung vermissen lassen. Aufgrund des fehlenden Verständnisses für die Transport-, Transfer- und Transformationsprozesse im Knetter konnten bisher gebaute Geräte nicht mit der nötigen Dauerfestigkeit und Sicherheit für den lösemittelfreien Betrieb ausgelegt werden.

Durch experimentelle und theoretische Untersuchungen in unserer Arbeitsgruppe und in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern im Rahmen eines von sechs Teilprojekten des EU F<sup>3</sup>-Projektes sollen diese Schwachstellen überwunden werden und die Grundlagen für die Intensivierung von Hochviskos-Prozessen im kontinuierlich betriebenen Knetter erarbeitet werden.

Als Versuchsanlage wird vom Industriepartner Buss-SMS-Canzler GmbH, Pratteln, Schweiz der in Abbildung 1 dargestellte Knetapparat mit einem Reaktorvolumen von circa fünf Litern zur Verfügung gestellt.

Bei diesem kontinuierlich arbeitenden Knetter fließt das Versuchsmaterial durch die Knetkammer, die die Grundfläche einer liegenden Acht hat (Abbildung 2), und verlässt den Knetter über ein Wehr am Ausgang. In der Knetkammer wird es durch das Misch(Knet-)werkzeug – zwei mit Barren versehenen, ineinander greifenden Wellen – komplexen Bewegungen und Verformungen ausgesetzt. Die beiden in



Abb. 2: Ansicht der Knetkammer von vorn.

gleicher Richtung drehenden Knetwellen greifen so ineinander, dass sie sich gegenseitig von anhaftendem Versuchsmaterial reinigen.

Die eigenen Arbeiten in diesem Projekt betreffen insbesondere die Untersuchung des Mischverhaltens sowohl in axialer wie auch radialer Richtung, des Entgasungsverhaltens sowie der mechanischen Beanspruchung des Mischwerkzeugs.

### Mischen als Basisprozess

Für die angestrebte Prozessintensivierung im Knetter ist die Kenntnis seines Mischverhaltens grundlegend. Die effiziente Vermischung der miteinander reagierenden Stoffe in radialer Richtung (senkrecht zur Strömungsrichtung) ist für eine chemische Reaktion unerlässlich. Hingegen ist eine axiale Rückvermischung möglichst gering zu halten, da sie zur Absenkung der Konzentrationsniveaus und damit der Reaktionsgeschwindigkeit führt.

Zur experimentellen Charakterisierung des Mischens eignet sich das Verteilungsverhalten von Markierungssubstanzen (Tracer), die z. B. als Farbstoff injiziert werden. Als Modellsubstanz für einen hochviskosen Stoff wird Silikonöl mit einer Viskosität bis zu  $\eta=2000 \text{ Pa s}$  eingesetzt, d. h. ein Öl, das bis zu zwei Millionen Mal zähflüssiger als Wasser bzw. bis zu zweitausend Mal zähflüssiger als nicht auskristallisierter Honig ist.

### Axiales Mischen

Erfolgt die Zugabe von Tracer stoßartig am Eingang des Kneters, kann aus der mittels optischer Analyse zugänglichen normierten zeitlichen Antwortfunktion  $E(\theta)$  am Ausgang des Reaktors auf die axiale Rückvermischung (Dispersion) geschlossen werden (Abbildung 3).  $\theta$  ist die auf die mittlere Verweilzeit  $\tau$  normierte Zeit ( $\tau = \text{Reaktorvolumen}/\text{Volumendurchsatz}$ ).

Je enger die Verteilung ist, desto geringer ist die Rückvermischung. Eine Maßzahl für diese ist die Bodensteinzahl  $Bo$ , die gemäß dem axialen Dispersionsmodell nach Dankwerts umgekehrt proportional zur Rückvermischung ist. Versuche in Abhängigkeit von Drehzahl und Durchsatz<sup>[3]</sup> zeigen Werte der Bodensteinzahl im Bereich von  $Bo=30-80$ . Diese belegen, dass sich der Knetter wie ein reales Strömungsrohr mit

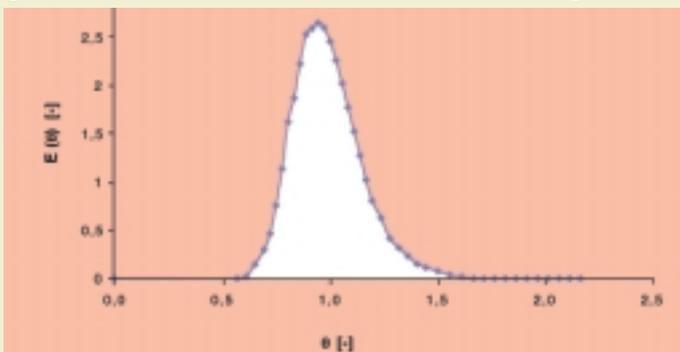


Abb. 3: Verteilung eines am Eingang zugegebenen Farbstoffimpulses am Ausgang des Kneters.

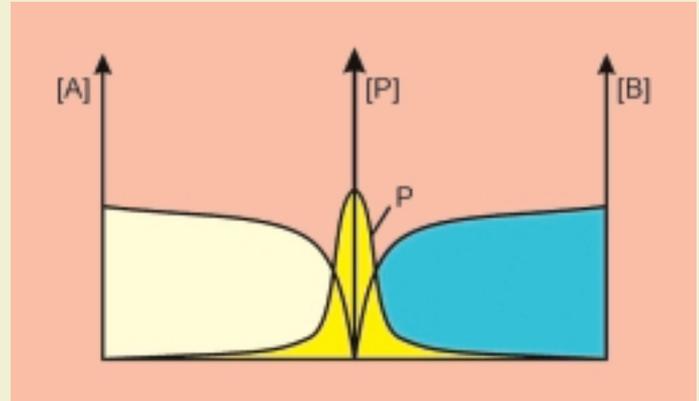


Abb. 4: Bildung des Produkts P gemäß der chemischen Reaktion  $A+B \rightarrow P$  an der Kontaktfläche.

moderater Rückvermischung verhält und dementsprechend einen Umsatz nahe am kinetisch maximal Möglichen erzielt.

### Radiales Mischen

Aufgrund des großen Durchmessers des Knetreaktors im Vergleich zum Extruder kommt der raschen radialen Homogenisierung besondere Bedeutung zu.<sup>[4]</sup> Dieses radiale Mischen lässt sich durch die Verteilung eines Farbstofftracers senkrecht zur Strömungsrichtung ermitteln.

Farbstofftracer spiegeln die Vermischung bis auf eine Längenskala des sichtbaren Lichts von einigen hundert Nanometern, die so genannte Makrovermischung, wider. Für die Untersuchung der für chemische Reaktionen wesentlichen Vermischung auf molekularer Ebene (Längenskala wenige Nanometer), die so genannte Mikrovermischung, ist ein Tracer erforderlich, der z. B. durch eine chemische Reaktion zweiter Ordnung aus den Reaktanden A und B quasi instantan (sehr schnell) gebildet wird.

Als geeignete Reaktion im Knetgut Silikonöl hat sich die von 2-Nitrophenol mit Dibutylamin erwiesen. Durch die ausgeprägte Zähflüssigkeit des Silikonöls ist der diffusive Transport der Reaktanden zueinander stark unterdrückt. Die Reaktion ist nur an der Kontaktfläche von Fluidelementen möglich, die jeweils einen der Reaktanden beinhalten (Abbildung 4). Die Kontaktfläche wird durch die Knetprozesse erst gebildet und durch die gebildete Produktmenge messbar.

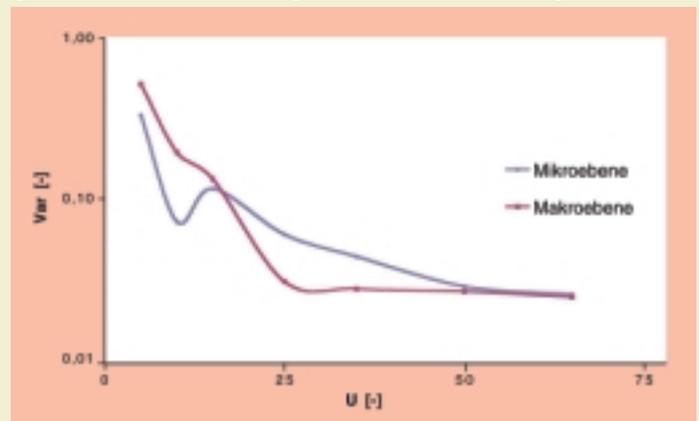


Abb. 5: Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Anzahl der Knetschläge U.

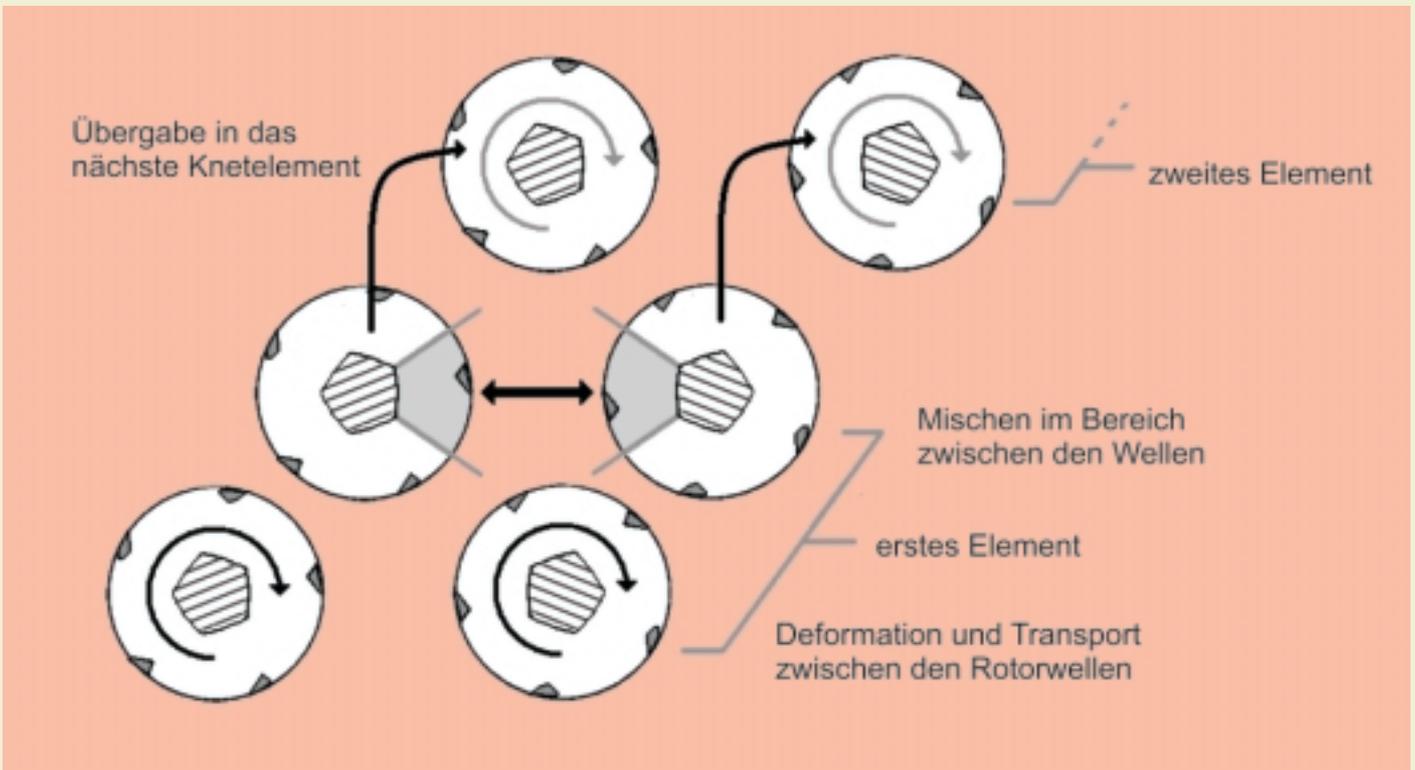


Abb. 6: Transformation des Zweiwellenapparats in zwei Einwellenapparate mit Stoffaustausch zwischen diesen.

Letztere ist somit ein Maß für die Mikrovermischung im Knetter.

Die Reaktanden werden über getrennte Pumpensysteme an zwei radial möglichst weit voneinander entfernten Positionen zudosiert und von dort mit dem Hauptstrom transportiert. Durch die chemische Reaktion wird entlang des Strömungswegs das Produkt gebildet, das durch optische Analyse quantifiziert werden kann. Aus der Konzentrationsverteilung des Produktes lässt sich der sogenannte Variationskoeffizient  $Var$  berechnen, dessen Wert eine belastbare Kenngröße für die Homogenität ist. Ein Variationskoeffizient  $Var < 0,03$  hat sich als Beleg für eine ausreichende Homogenität erwiesen.

Die Versuchsergebnisse in Abbildung 5 zeigen exemplarisch, dass auf makroskopischer Ebene die Homogenisierung schon nach 25 Knetschlägen  $U$  bzw. fünf Wellenumdrehungen erfolgt. Selbst unter Berücksichtigung des molekularen Transportes auf Mikroebene werden nur circa doppelt so viele Knetschläge benötigt. Dies belegt das Potenzial des Kneters, hochviskose Phasen effizient zu mischen.

### Modellierung des Mischens

Neben den realen Experimenten liefern auch virtuelle Experimente – rechnergestützte Simulationen – Erkenntnisse zu den im Knetter ablaufenden Mischprozessen. Aufgrund der komplexen, ineinander greifenden Geometrie der Knetorgane ist eine Direkte Numerische Simulation unter Auflösung aller relevanten Skalen derzeit nicht möglich.

Hilfsweise wird deshalb das Konzept der vereinfachenden Modellierung herangezogen.<sup>[5]</sup> Hierzu wird der Zwei-Wellen-Knetter in durch das Knetwerkzeug vorgegebene Elementar-

zellen zerlegt. Die beiden Wellen werden gedanklich auseinandergezogen, so dass einwellige, nicht einander durchdringende Bereiche entstehen. Der Mischprozess wird dann auf Transportprozesse zwischen Rotor und Wand in jedem dieser einwelligen, rotationssymmetrischen Teilgebiete zurückgeführt, ergänzt durch einen Transportprozess zwischen diesen (Abbildung 6).

Für die in der Komplexität und der Dynamik erheblich vereinfachte einwellige Elementarzelle ist es nun möglich, das stationäre Strömungsfeld mittels kommerzieller CFD-Software (hier FLUENT) zu berechnen. Zur Visualisierung der Mischprozesse bietet sich das bezüglich numerischer Diffusion vorteilhafte Verfahren des Partikeltrackings an. Im Einlassquerschnitt der gitterunterlegten Elementarzelle werden massefreie und dadurch mit der Strömung wechselwirkungsfrei bewegte Partikel eingebracht. Ihre Geschwindigkeit lässt sich mittels Runge-Kutta-Verfahren aus dem Strömungsfeld des Silikonöls interpolieren. Die Bahnen der Partikel werden bis zum Auslassquerschnitt der Elementarzelle verfolgt. Die Verknüpfung der Start- und Endpositionen der Partikel erfolgt mittels einer Mappingmatrix. Sie spiegelt das Mischverhalten im untersuchten Gebiet wider. Aufgrund der Periodizität der  $n$  Elementarzellen des Kneters kann dann der Gesamtmischprozess durch  $n$ -fache Matrizenmultiplikation abgebildet werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die erforderliche, aufwändige Berechnung des Strömungsfelds bei definierter Geometrie und gegebenen Betriebsbedingungen nur einmal für eine Elementarzelle durchgeführt werden muss. Zur Beschreibung der zweiwelligen Elementarwelle wird die Berechnung des einwelligen Teilbereichs gedoppelt. Der notwendige Transportterm zwischen beiden kann dann

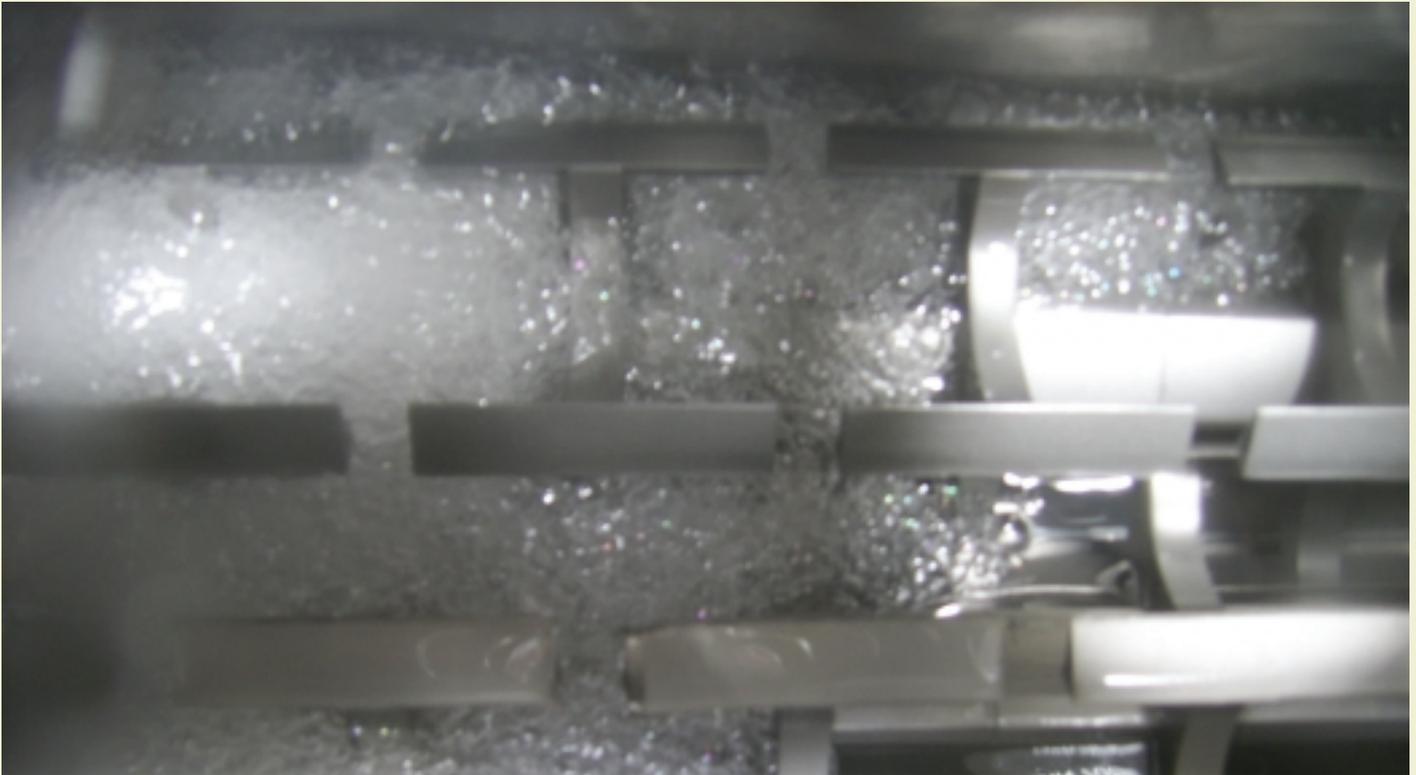


Abb. 7: Schaumbildung während der Entgasung im Knetzer.

durch einen einmaligen Streckungs- und Faltungsprozess gemäß der Bäcker-Methode modelliert werden.

Die Simulationen auf Basis dieser vereinfachten Modellierung geben deutliche Hinweise für die Auslegung des Kneters:

- Die Installation von statischen Knethaken an der Reaktorwand beschleunigt den Mischprozess wesentlich.
- Die Zugabe von Compoundiergut sollte nicht zwischen die Wellen erfolgen, sondern bevorzugt zwischen einer Welle und der Gehäusewand.

Sie wurden mit dem Anlagenbauer diskutiert und von diesem erfolgreich umgesetzt.

### Entgasungsverhalten

Die Entgasung hochpolymerer Substanzen ist ein wichtiger Reaktions- und Aufarbeitungsschritt, zum einen, um bei der Polymerisation gebildete volatile Komponenten zur

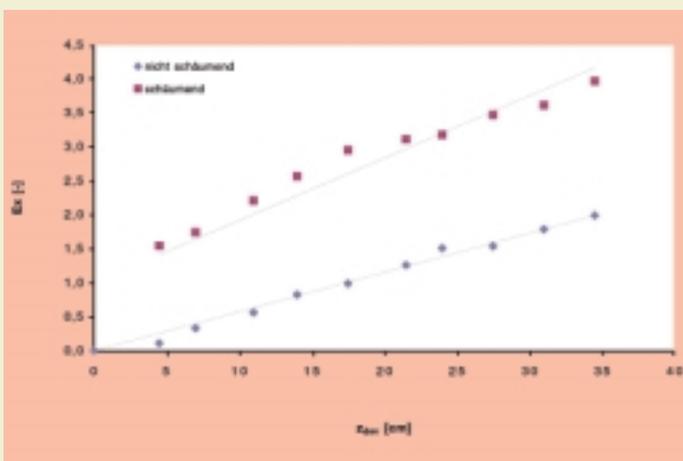


Abb. 8: Extraktionszahl in Abhängigkeit von der Entgasungsstrecke (Stoffsystem n-Heptan/Silikonöl mit  $\eta=100 \text{ Pa s}$ ).

Erhöhung des Umsatzes aus dem Reaktionsgleichgewicht zu entfernen, zum anderen, um Restmonomere zu eliminieren. Hierzu eignet sich der Knetzer aufgrund der enormen Oberflächenvergrößerung beim Auseinanderziehen dünner Fluidfilme und -stränge in besonderem Maße. Die teilgefüllte Betriebsweise und die stete Oberflächenerneuerung halten einen hohen Konzentrationsgradienten der flüchtigen Komponente zwischen den Phasen aufrecht.<sup>[6]</sup> Darüber hinaus kann durch geeignete Maßnahmen, insbesondere durch Unterdruck, die Gleichgewichtskonzentration bzw. der Partialdruck in der Gasphase niedrig gehalten werden. Wird die Gleichgewichtskonzentration in der Flüssigphase erreicht, kann unter gegebenen Entgasungsbedingungen keine niedrigere Konzentration erreicht werden. Ist bei der Entgasung der Partialdruck des zu entgasenden Fluides größer als der Systemdruck im Knetzer, kommt es über Bläschenbildung zur Oberflächenerweiterung (Abbildung 7). Diese Schaumbildung begünstigt den Stoffaustausch erheblich.<sup>[7]</sup>

Die für die Entgasung charakteristische Extraktionszahl  $Ex$  lässt sich aus der relativen Änderung der gelösten bzw. dispergierten Kontamination in Abhängigkeit von der Entgasungszeit  $t_{dev}$  bzw. von der Entgasungsstrecke  $z_{dev}$  berechnen. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 8 zeigen exemplarisch für den kontinuierlichen Fall, dass die Entgasung unter Schäumen direkt zu Beginn sprunghaft erfolgt und danach linear ansteigt. Der Großteil des Stofftransfers ist bereits im Eingangsbereich des Kneters abgeschlossen. Die dort erfolgte Entgasung kann bessere Gesamtergebnisse liefern als dies ohne Schaumbildung im gesamten Apparat möglich ist. Aus der Extraktionszahl ist der Entgasungswirkungsgrad  $EW$

$$EW=1-\exp(-Ex)$$

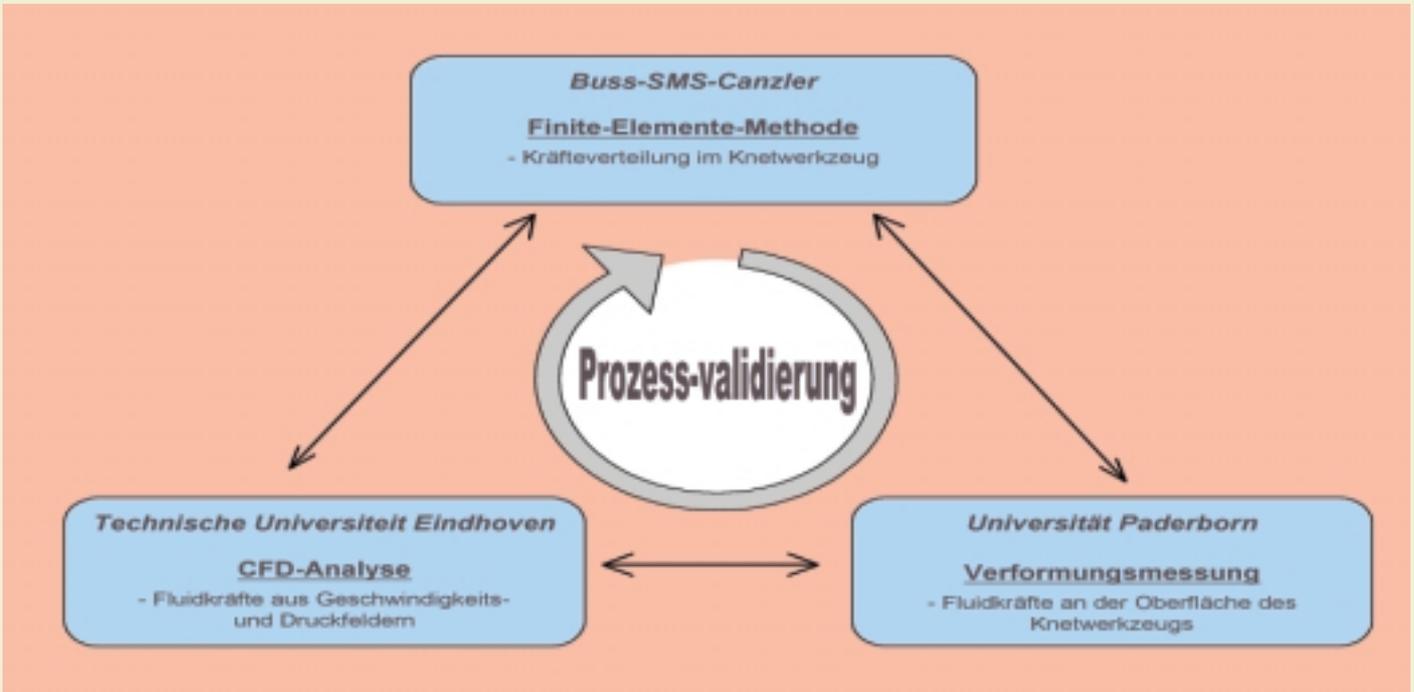


Abb. 9: Vernetzung der Projektpartner für die Ermittlung der mechanischen Belastung.

bestimmbar. Im Rahmen der eigenen Messungen mit hochviskosen Medien im Knetter wurden weitgehend Werte für EW<sub>95</sub> Prozent erzielt, was auch durch Ergebnisse aus Industrieversuchen bestätigt wird. Dies belegt die besondere Eignung des Kneters zur Entfernung flüchtiger Komponenten.

**Mechanische Belastung**

Aufgrund der sehr hohen Viskosität der im Knetter zu verarbeitenden Substanzen müssen die Knetwerkzeuge äußerst stabil ausgelegt sein. Da außerdem die Knethaken beider Wellen zur Erreichung der geforderten hohen Selbstreinigung sehr dicht aneinander vorbeigeführt werden, darf nur eine sehr geringfügige Verformung der Knetwellen erfolgen. Die Verformung des Knetwerkzeugs, d. h. die Verteilung der Kräfte in diesem, wird vom Partner Buss-SMS-Canzler GmbH rechnerisch mittels der Finite-Elemente-Methode analysiert. Die verursachenden Fluidkräfte hierfür werden einerseits von der Technischen Universität Eindhoven (Prof. Patrick Anderson) mittels CFD-Analyse des Strömungsfeldes im vollgefüllten Knetter erarbeitet, andererseits in unserem Arbeitskreis in Kooperation mit der Kunststofftechnik Paderborn (Prof. Volker Schöppner) über die Verformung der Oberfläche experimentell ermittelt (Abbildung 9).

Hierzu sind an Schlüsselstellen auf den Wellen Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert. DMS sind Dehnungssensoren, die schon bei geringen Verformungen ihren elektrischen Widerstand ändern. Je Welle des Doppelrotors ist ein Dehnungsmessstreifen aufgebracht und dient dazu, das Drehmoment der gesamten Welle zu messen. Zusätzlich werden die Belastungen auch lokal an den Wellenschäften und an den Knetbarren mittels DMS gemessen. Zur Berücksichtigung der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Silikonöls sind zusätzlich Temperatursenso-

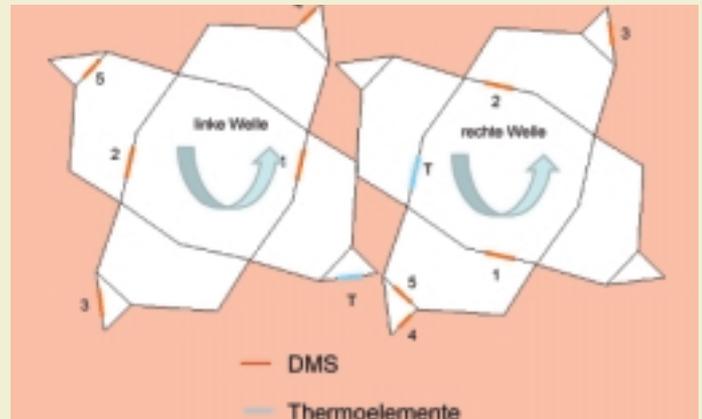


Abb. 10: Positionen der Dehnungsmessstreifen und Thermoelemente.

ren auf den Knetwellen installiert worden (Abbildung 10). Erste Experimente bei diskontinuierlicher Betriebsweise zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Zug- und Druckbelastungen. Somit ist die Grundlage geschaffen, mit dem validierten Simulationsprogramm Variationen im Design der Knetorgane gezielt vornehmen zu können und in ihren Auswirkungen kostengünstig zu testen.

**Fazit**

In dem hier aufgezeigten europäischen Verbundprojekt soll mittels schnellerer und flexiblerer Herstellungsverfahren die weltweite Technologieführerschaft der europäischen Chemieindustrie nachhaltig gestärkt und die Wettbewerbsfähigkeit verbessert werden. Ziel ist es, die modulare kontinuierlich betriebene Fabrik der Zukunft als Prototyp (F<sup>3</sup> Factory) methodisch zu entwickeln, zugehörige Prozesse und Schnittstellen zu standardisieren sowie die F<sup>3</sup> Factory für konkrete Produkte zu demonstrieren. Dazu sollen ganzheitliche Strategien zur Prozessintensivierung angewendet

werden, um sparsamer mit den eingesetzten Rohstoffen und Energien umzugehen. Denn zusammen bedingen diese rund 70 bis 80 Prozent der Herstellungskosten und damit meist deutlich mehr als der Kostenfaktor Arbeit.

Die hier vorgestellten eigenen Ergebnisse bezüglich des innovativen Kneters sind ein wesentlicher Beitrag zu den oben dargelegten Zielen. Sie belegen das hohe Potenzial des Kneters für die Intensivierung von Hochviskos-Prozessen. Durch Verzicht auf Lösemittel wird ein zentraler Beitrag zur Einsparung von energetischen und stofflichen Ressourcen sowie von Prozessschritten erbracht. Durch die Möglichkeit der verlässlichen Berechnung der auf die Apparateile wirkenden Kräfte und ihre Auswirkungen im Apparatematerial im Verbund der Projektpartner wird ein sicherer Betrieb von kontinuierlichen Knetern in Zukunft ermöglicht.

### Literatur

[1] [HTTP://WWW.F3FACTORY.COM](http://www.f3factory.com)

[2] A. DIENER, HERSTELLUNG UND AUFARBEITUNG VERSCHIEDENER POLYMERE IN GROSSVOLUMIGEN KNETERN, 6. KUNSTSTOFF-KOLLOQUIUM, SCHWARZHEIDE, 2005.

[3] O. SECK, METHODENENTWICKLUNG ZUR UNTERSUCHUNG DES MISCH- UND ENTGASUNGSVERHALTENS IN KNETREAKTOREN, VORGELEGTE DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

[4] O. SECK, T. MAXISCH, D. BOTHE, H.-J. WARNECKE, INVESTIGATION OF THE MIXING BEHAVIOR AND THE GENERATION OF CONTACT-AREA IN A CONTINUOUS TWIN-SHAFT KNEADER, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS CONFERENCE PROCEEDINGS, VOLUME 1207, (PP.) 105–112 (2010).

[5] T. MAXISCH, MODELLBASIERTE METHODEN ZUR SIMULATIVEN BESCHREIBUNG DES MISCHVERHALTENS VON KNETREAKTOREN, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

[6] O. SECK, T. MAXISCH, D. BOTHE, H.-J. WARNECKE, INVESTIGATION OF THE MIXING AND DEVOLATILIZATION BEHAVIOR IN A TWIN-SHAFT KNEADER, MACROMOLECULAR SYMPOSIA, VOLUME 289, ISSUE 1, (PP.) 155–164 (2010).

[7] I. GESTRING, ENTGASEN VON POLYMEREN, DISSERTATION, UNIVERSITÄT HANNOVER, 2002.



**M. Sc. Oliver Seck** ist seit September 2006 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Technischen Chemie und Chemischen Verfahrenstechnik angestellt, seit Januar 2010 auch bei der Firma Buss-SMS-Canzler GmbH.



**B. Sc. Marko Gemmerich** ist seit Oktober 2008 Student im Masterstudiengang Chemie an der Universität Paderborn.



**Dr.-Ing. Christian Hennig** hat Maschinenbau studiert und ist seit 1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Technischen Chemie und Chemischen Verfahrenstechnik. Er ist seit Oktober 2005 in der Geschäftsführung der Fakultät für Naturwissenschaften tätig.

### Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Warnecke**

**Fakultät für Naturwissenschaften**

**Department Chemie**

**05251 60-5704**

**[h.j.warnecke@upb.de](mailto:h.j.warnecke@upb.de)**

# UNI Paderborn

Heute noch Schule ...



... morgen schon **MINT**

Hochschulmarketing, Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, Tel.: 0525140-9880



UNIVERSITÄT PADERBORN  
Die Universität der Informationsgesellschaft

[www.uni-paderborn.de/mint-studieren](http://www.uni-paderborn.de/mint-studieren)

- ▶ MATHEMATIK
- ▶ INFORMATIK
- ▶ CHEMIE

- ▶ PHYSIK
- ▶ ELEKTROTECHNIK
- ▶ MASCHINENBAU

# Türkisch-deutsche Literatur und Kultur

## Die Arbeit des bilateralen Forschungsprojekts „Turkish-German Relations and Cultural Transfer“

Prof. Dr. Michael Hofmann, Tobias Zenker M. A.

**Im Oktober 2011 ist der 50. Jahrestag der Unterzeichnung des Anwerbeabkommens zwischen Deutschland und der Türkei. Ein halbes Jahrhundert türkisch-deutscher Kulturaustausch verlangt nach einer umfassenden Betrachtung türkisch-deutschen Lebens und türkisch-deutscher Kulturproduktion in Deutschland. Die vielfältigen Begegnungen zwischen den beiden Kulturen sind Gegenstand des bilateralen Forschungsprojekts „Turkish-German Relations and Cultural Transfer“ der Universitäten Paderborn und Istanbul.**

Am 30. Oktober 1961 schloss die Bundesrepublik Deutschland das Anwerbeabkommen mit der Türkei, um den Nachschub an Arbeitskräften für die damals stark wachsende deutsche Wirtschaft zu gewährleisten. Was aus einem wirtschaftlichen Impetus heraus begonnen wurde, hat sich in 50 Jahren weit über diesen Bereich weiterentwickelt. Mittlerweile leben Deutsch-Türken der dritten und vierten Generation in Deutschland und prägen als zweitgrößte Bevölkerungsgruppe mit ihrer besonderen Perspektive zwischen deutscher und türkischer Kultur das Leben in Deutschland. Die Prägung des kulturellen Lebens durch türkisch-deutsche Einwanderer gehört zu den zentralen Perspektiven des bilateralen Forschungsprojekts zwischen der Universität Paderborn und der Istanbul Üniversitesi.

Unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Hofmann (Paderborn) und Prof. Dr. Şeyda Ozil (Istanbul) erforschen die Projektgruppen beider Universitäten seit 2009 unter dem Titel „Turkish-German Relations and Cultural Transfer“ aus verschiedenen Blickrichtungen die türkisch-deutsche Kultur. Während sich die Istanbul Kooperationspartner (gefördert von Scientific and Technological Research Council of Turkey/TÜBİTAK) linguistischen Vergleichsstudien und dem Diskurs über türkisch-deutsche Kulturkontakte in den Printmedien widmen, beschäftigt sich die Paderborner Gruppe (gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung/BMBF), ausgehend von einem weit gefassten Kulturbegriff, mit der türkisch-deutschen Kultur sowohl aus einer historisch-kulturwissenschaftlichen als auch literaturwissenschaftlichen Perspektive. Letztere erkennt die türkisch-deutsche Literatur als einen zentralen Begegnungsraum des Interkulturellen in Deutschland und gesteht vor allem der zweiten und dritten Generation türkisch-deutscher Autoren eine Autonomie zu, die jenseits von Klischeebildern und Stereotypen eine eigene literarische Qualität entfaltet, oder wie Michael Hofmann konstatiert: Die Autoren der zweiten und dritten Generation „repräsentieren nichts und



**Prof. Dr. Michael Hofmann** ist seit Oktober 2004 am Lehrstuhl für Neuere Deutsche Literaturwissenschaft und Literaturdidaktik an der Universität Paderborn. Seine Forschungsschwerpunkte sind: Aufklärung, Weimarer Klassik, Literatur nach Auschwitz, interkulturelle Literaturwissenschaft.



**Tobias Zenker M. A.** ist stellvertretender Projektleiter des deutsch-türkischen Forschungsprojekts am Institut für Germanistik und Vergleichende Literaturwissenschaft (Projektleitung: Prof. Dr. Michael Hofmann/Prof. Dr. Şeyda Ozil). Darüber hinaus arbeitet er an einer Dissertation zum deutsch-türkischen Theater.

niemanden; sie profilieren sich durch eine eigenständige Perspektive, durch eigenständige Sprache; sie entwickeln literarische Konzepte und Modelle, die aus der produktiven Auseinandersetzung mit eigenen biografischen und gesellschaftlichen Erfahrungen heraus entstanden, auf diese Erfahrungen aber nicht zu reduzieren sind“ (Hofmann 2006, S. 196). Dass diese Literatur eine Herausforderung für türkische wie deutsche Leser darstellt, ist Symptom ihres interkulturellen Potenzials; eines Potenzials, das sich auf die Selbstverständlichkeit der Leseridentität auswirkt und imstande ist, die Vorstellungen von der eigenen wie der türkischen Kultur in Bewegung zu bringen und damit kulturvermittelnd zu wirken. Diese für den gesellschaftlichen Prozess bedeutsame Eigenschaft interkultureller Literatur und die gesellschaftlichen wie literarischen Bedingungen, in der die türkisch-deutsche Literatur entstanden und eingebettet ist, sind Grundlage der Arbeit des Forschungsprojekts. Durch Publikationen, Konferenzen und Tagungen, Öffentlichkeitsarbeit sowie Nachwuchsförderung sollen bestehende Desiderate ausgefüllt und eine umfassende



© bpk Bayerische Staatsbibliothek/Felicitas Timpe

Abb. 1: Ankunft türkischer Arbeiter 1964.

Dokumentation türkisch-deutscher Literatur- und Kulturgeschichte sowohl der wissenschaftlichen Fachwelt als auch einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Die Universität Paderborn profiliert sich durch die Kooperation mit der Istanbul Üniversitesi und der Vernetzung mit der Paderborner Theologie, der internationalen Germanistik und verschiedenen Turkologien in Deutschland als eines der wichtigsten Zentren kulturwissenschaftlicher Studien zur türkisch-deutschen Kultur und Literatur in der Bundesrepublik.

### **Türkisch-deutsche Kultur: Literatur, Film, Theater, Kabarett, Comedy**

Bis Anfang der 1990er Jahre ist die Kulturproduktion türkisch-deutscher Künstler in der Öffentlichkeit nur vereinzelt wahrgenommen worden. Zwar hatten die Katzenkrimis von Akif Pirinçci oder die Fernsehpräsenz von Renan Demirkan bereits in den 1980er Jahren großen Zuspruch gefunden, und Emine Sevgi Özdamar hatte sich Anerkennung durch den ihr verliehenen Ingeborg-Bachmann-Preis (1991) verschafft, doch begann eine breite Rezeption erst mit Feridun Zaimoğlus Buch „Kanak Sprak“ (1995) und der etwa zeitgleich entstehenden Jugendbewegung „Kanak Attak“, in der eine junge Generation von Deutsch-Türken einerseits ihr Selbstbewusstsein gegenüber dem Mainstream darstellen wollte und sich andererseits der zunehmenden Xenophobie

entgegenstellte, die in den Brandanschlägen von Mölln (1992) und Solingen (1993) kulminierte. Zaimoğlu, der mittlerweile ein ansehnliches Werk aus Romanen, Theaterstücken und Essays vorgelegt hat, ist einer der prominentesten Vertreter der Deutsch-Türken und auf nahezu allen Integrationsveranstaltungen präsent, unter anderem auch der Islamkonferenz.

Andere Künstler sind vor allem durch die Neuen Medien bekannt geworden. Der Regisseur Fatih Akin, der 2004 mit dem Film „Gegen die Wand“ mit dem Goldenen Bären auf der Biennale in Berlin ausgezeichnet wurde und mit „Auf der anderen Seite“ 2008 als bester deutscher Beitrag an der Vornominierung für den besten nicht-englischsprachigen Film für die Oscar-Verleihung teilnahm, gilt in der gegenwärtigen internationalen Filmszene als der Regisseur des modernen deutschen Films. Der TV-Comedian Kaya Yanar wiederum, dessen Slogan „Was guckst Du?“ mittlerweile als Redewendung in die gegenwärtige Popkultur eingegangen ist, ist prominentester Vertreter erfolgreicher türkischer Ethno-Comedians, zu denen auch Fatih Çevikkollu, Django Asül oder der 2009 mit dem Comedy-Preis ausgezeichnete Bülent Ceylan zählen.

Ein halbes Jahrhundert kultureller Produktion von Deutsch-Türken kommt nicht nur kulturellen Zentren wie Berlin und Hamburg, sondern vor allem auch dem Ruhrgebiet zugute, wo 2010 das Jahr der Kulturhauptstadt zusammen mit Istanbul stattfand. Die Wanderausstellung des Duisburger Kultur-

referenten Tayfun Demir 2008 dokumentiert die literarische Entwicklung von über einhundert Autoren, zu denen auch Bundesverdienstkreuzträger wie Yüksel Pazarkaya und Renan Demirkan zählen (vgl. Demir 2008).

In der Literatur der 1960er und 1970er Jahre wurde überwiegend die Trennung von der Heimat, die Wanderung selbst und die Konfrontation mit der unbekannt Fremde thematisiert. Zumeist noch in türkischer Sprache geschrieben, fanden die Gedanken der Autoren der ersten Generation ihren Ausdruck in vielen literarischen Textformen: Erzählungen, Kurzgeschichten, Märchen, Theaterstücken und vor allem in Gedichten. Einer dieser frühen Autoren ist Yüksel Pazarkaya, der sich auf dem Feld der Kulturvermittlung durch Sachbücher („Rosen im Frost. Einblicke in die türkische Kultur“, 1982; „Spuren des Brots. Zur Lage ausländischer Arbeiter“, 1983), Essays, die Herausgabe von Anthologien und vor allem durch die Übersetzung türkischsprachiger Literatur ins Deutsche verdient gemacht hat und darüber hinaus auch Romane, Kinderbücher, Theaterstücke und Lyrik schreibt.



© Michael Lucan

**Zafer Şenocak**, geboren 1961 in Ankara/Türkei, ist seit 1970 in Deutschland. Er ist Schriftsteller und Publizist. 1988 wurde er mit dem Adelbert-von-Chamisso-Förderpreis ausgezeichnet.

Die zweite Generation türkisch-deutscher Autoren, deren Literatur im Wandel der Zeit auch nicht mehr mit der mittlerweile unpassenden Bezeichnung „Gastarbeiterliteratur“ gekennzeichnet wurde, begann sich in der deutschen Kulturszene nun stärker durchzusetzen (der Terminus „Gastarbeiter“ ist ein Ausdruck hierarchisierender Gesellschaftsvorstellungen und daher kritisch zu betrachten). Sie schreiben auf Deutsch, in einer Sprache, in der sie in deutschen Schulen und in der deutschen Gesellschaft von Kindheit an sozialisiert wurden. Autoren wie Emine Sevgi Özdamar oder Zafer Şenocak distanzieren sich von der so genannten „Betroffenheitsliteratur“ der ersten Generation und schaffen ein neues Œuvre, das Türkisches und Deutsches zu einer neuen hybriden Ausdrucksform verbindet (Yeşilada 2008, S. 11–15.). Der deutsche Leser wird durch diese Literatur herausgefordert, darüber zu reflektieren, „[...] was er als deutsche Literatur und deutsche Identität begreift“ (Hofmann 2006, S. 201). Şenocaks Lyrik zum Beispiel zeichnet sich durch eine starke sprachliche Dichte und einen großen metaphorischen Reichtum aus. Seine Position als hybrides Subjekt, als autonomes Ich, das seine Identität nicht aus dichotomischen Gesellschaftsvorstellungen von

nationaler Identitätszuweisung gewinnt, kommt etwa in einem Gedicht aus dem 2005 entstandenen Gedichtband „Übergang“ zum Ausdruck (Şenocak 2005, S. 10):

schau auf die Landkarte  
und such dir ein behagliches Haus  
alles Leben endet auf einmal dort

viel später wirst du feststellen  
daß es das Land nicht mehr gibt  
auf dem dein Haus steht  
dein Grundbuch wird angezweifelt

du beschreibst in deinen Worten das untergegangene Land  
werden dich die Kartographen verstehen  
die Grenzen in deiner Sprache  
jemals wieder den Grenzen  
deines Grundstücks entsprechen

deine Väter haben vorgesorgt  
ihre Grabsteine sind mehrsprachig

Die Identität des lyrischen Ichs ist zunächst an zwei Kategorien gebunden: an einen Ort und an die Sprache. Bei Şenocak sind die Orientierungspunkte Ort und Sprache jedoch kontingent und lassen eine Rekonstruktion von Identität mittels der Sprache scheitern. Die Kartografen können die Sprache nicht identifizieren, nicht zuordnen. Letztlich bleibt die Einsicht, dass alle Sprache historisch gebunden bleibt und in Bewegung ist. In diesem Gedicht kommt eine Überzeugung zum Ausdruck, die sich gegen den bisher üblichen Umgang mit Migrationsliteratur wendet, der dadurch geprägt ist, dass man der türkisch-deutschen Literatur einen abgesteckten Raum „zwischen“ den Kulturen zuweist oder wie die amerikanische Literaturwissenschaftlerin Leslie A. Adelson konstatiert: „Doch die Trope des „Dazwischens“ wirkt oft buchstäblich wie ein Reservat, das dazu dient, Erkenntnisse einzuschränken und zu behindern, anstatt sie zu ermöglichen“ (Adelson 2006, S. 37). Aufgabe einer interkulturellen Literaturwissenschaft ist es demnach, der türkisch-deutschen Literatur einen Eigenwert beizumessen, der jenseits nationalkultureller Zuschreibungen liegt, denn „[e]s ist absurd, heutzutage noch davon auszugehen, dass sie [die türkisch-deutschen Autoren, TZ] immer und notwendigerweise und ausschließlich die nationalstaatliche Kultur der Türkei repräsentieren“ (Adelson 2006, S. 39). Die identitätsbezogene Kontingenz des lyrischen Ichs ist demnach nicht nur auf die Erfahrung türkisch-deutscher Migration zu reduzieren, sondern sollte als Ausdruck der Erfahrungen von Individuen in unserer postmodernen, globalisierten Welt im Allgemeinen verstanden werden.

Şenocaks Arbeit weist aber auch über die Literatur hinaus. Seit 1998 arbeitet er mit dem Münchner Theaterkünstler Berkan Karpat zusammen. Zwischen Theater, Performance und Skulptur schafft Karpat Kunst, die ebenfalls von ihrer

doppelten Anbindung an die türkische und deutsche Kultur lebt. Das mehrteilige Großprojekt „Landung auf Goldpapier“ zum Beispiel verbindet die Städte Istanbul und München miteinander, indem Karpat sie zugleich zum konzeptionellen Bestandteil und Ausstellungsort seiner Kunst macht und persisch-islamische und christliche Traditionen künstlerisch aufeinander bezieht (<http://www.karpat.de>).

Karpat und Şenocak sind nur zwei Beispiele für eine vielfältige, anspruchsvolle türkisch-deutsche Kulturszene in Deutschland, die seitens der Wissenschaft bislang kaum beleuchtet wurde. Das türkisch-deutsche Forschungsprojekt hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, in diesem Jahr das „Handbuch der türkisch-deutschen Literatur“ herauszugeben, das einen Überblick über das Leben und Werk türkisch-deutscher Künstler gibt, Entwicklungen in den Bereichen Literatur, Film, Comedy, Kabarett und Theater nachzeichnet und damit eine profunde Arbeitsgrundlage bietet, um sich mit türkisch-deutscher Kulturproduktion in Deutschland auseinanderzusetzen (Würzburg: Königshausen & Neumann 2011).

#### **Aktueller Blick:**

##### **Kulturgeschichte türkisch-deutscher Einwanderung**

Der weite Kulturbegriff, dem sich das Forschungsprojekt verpflichtet hat, bildet die Grundlage dafür, verschiedene gesellschaftliche Entwicklungen, die durch die türkische Migration angestoßen wurden, zu betrachten und als eine Kulturgeschichte türkischer Einwanderung zu interpretieren. Dabei werden politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Voraussetzungen und Entwicklungen seit 1961 bis heute betrachtet, die maßgeblich mit der türkischen Einwanderung zu verknüpfen sind und in ihren Wandlungen Zeugnis über eine dynamische deutsche und türkisch-deutsche Mentalitätsgeschichte ablegen können. Die Kulturgeschichte betrachtet dabei nicht nur die großen Fragen wie den Beitritt der Türkei zur EU oder die wirtschaftlichen Voraussetzungen für den Anwerbevertrag des Wirtschaftswunderlandes Deutschland in den 1950er und 1960er Jahren, sondern widmet sich auch kleineren Phänomenen, die exemplarisch zeigen können, welchen Einfluss die türkische Migration auf die deutsche Mehrheitsgesellschaft hatte und hat und wie diese auf die türkische Minderheit reagiert. So spiegeln sich zum Beispiel in der Einreisegeschichte türkischer Arbeitsmigranten nach Deutschland gleichzeitig türkische wie deutsche Perspektiven auf die Arbeitsmigration wider: Von dem Wunsch erfüllt, sich und der Familie durch einen Arbeitsaufenthalt in Deutschland eine wirtschaftlich sichere Zukunft in der Türkei zu ermöglichen, nahmen türkische Männer und Frauen die teils als sehr erniedrigend empfundenen Auswahluntersuchungen der deutschen Anwerbestellen in Ankara und Istanbul in Kauf. So schildert Muzaffer Y. seine Erfahrung wie folgt: „Das Gebäude der Türkischen Bundesanstalt für Arbeit in Ankara war unheimlich voll. Wir sammelten uns in 15er bis 20er Gruppen in einem großen Raum. Sie hatten unsere Namen aufgerufen. Wir wurden dann vor die Ärzte geführt. Ein deutscher Arzt, zwei Ärztinnen; es war wie im Gerichtssaal. [...] Der Arzt untersuchte zuerst die Augen, dann die Ohren und die Zähne. Schließlich die Brust und den

Magenbereich [...]. Bei jedem hakte er dann mit seinem Finger an der Unterhose ein und zog sie runter ... In diesem Moment hat man kein Gefühl, nur Scham. Du schämst dich. Denn es sind Frauen im Raum – Ärztinnen [...]“ (Çil 2003, S. 13 und S. 15). In Sonderzügen und mit Arbeitsvertrag ging es dann zur zentralen Verteilungsstelle in Deutschland. Im Hauptbahnhof München fuhr auf dem Gleis 11 alle Sonderzüge der südlichen Anwerbeländer ein. Von diesem Ort aus wurden die Gastarbeiter in einen ehemaligen Luftschutzbunker aus dem Zweiten Weltkrieg unterhalb des Bahnhofs geführt, um dort, abgeschottet von der deutschen Öffentlichkeit, die Weiterverteilung der Arbeiter auf die verschiedenen Einsatzgebiete per Zug oder Flugzeug zu organisieren. Erst in jüngster Zeit wird dieses Vorgehen kritisch in der Öffentlichkeit aufgearbeitet. So inszenierten die Münchner Kammerspiele im Juni 2010 am Ort des Geschehens ein Dokumentartheaterstück (Regie: Christine Umpfenbach), das die Beteiligten teils dazu veranlasste, Analogien zu den straff organisierten Abtransporten europäischer Juden in die Konzentrationslager des NS-Regimes herzustellen (Süddeutsche Zeitung, 08.06.10, S. 41).

Neben solchen traumatischen Szenen des kollektiven türkisch-deutschen Kulturgedächtnisses rückt die Kulturgeschichte auch positive Entwicklungen der türkisch-deutschen Kultur in Deutschland in den Blick: die Erfolgsgeschichte türkischer Unternehmer wie Vural Öger, dem Begründer des gleichnamigen Touristikunternehmens, die Etablierung türkisch-deutscher Politiker wie Cem Özdemir oder die Veränderung der deutschen Esskultur durch die Einführung des Döner Kebab. Sie sind nur einige Beispiele dafür, wie sich die bundesdeutsche Kultur unter dem Einfluss türkischer Einwanderung entwickelt hat.

Das geplante Kompendium (Würzburg: Königshausen & Neumann 2011) führt somit verschiedene Stränge türkisch-deutscher Gesellschaftsentwicklung zusammen und schließt eine bestehende Forschungslücke, indem es einen spannenden wie lehrreichen Überblick über die Entwicklung der türkisch-deutschen Erfolgsgeschichte in Deutschland bietet.

#### **Historischer Blick:**

##### **Osmanendiskurse seit dem 16. Jahrhundert**

Dass nicht erst der Kulturkontakt der letzten 50 Jahre kollektive Vorstellungen über die Türken prägt, soll eine weitere historisch angelegte Perspektive eröffnen, welche die Osmanendiskurse in der Literatur seit dem 16. Jahrhundert in den Blick nimmt. Ein signifikantes Beispiel für den Niederschlag jahrhundertealter Kulturkontakte und Konflikte im gegenwärtigen kulturellen Gedächtnis unserer Mehrheitskultur bieten Schlagzeilen wie „Die Türken vor Europa“, die mit unschöner Regelmäßigkeit durch die deutschen Medien geistert und die kollektive europäische Erinnerung an die Türkenkriege des 16. und 17. Jahrhunderts wachruft.

Der Türke beziehungsweise Osmane als Paradebeispiel für das unheimliche Fremde ist in der Literatur der vergangenen fünf Jahrhunderte jedoch nicht nur als das Furchtbare oder Bedrohliche beschrieben worden. Ebenso ist das Unbekannte für die Literatur des Abendlandes faszinierend gewesen



© bpk Kupferstichkabinett, SMB

Abb. 2: Die Eroberung Konstantinopels durch die Türken unter Sultan Mohammed II. im Jahr 1453.

und der Diskurs hat dabei nicht nur das Exotische oder Erotische betont (vgl. Kleinlogel 1989), sondern eine Vielzahl an Zwischentönen hervorgebracht. So hat etwa der Nürnberger Autor Jakob Ayrer im 16. Jahrhundert neben einigen Fastnachtsspielen auch Dramen geschrieben, in denen ein sehr differenziertes Bild des Osmanen gezeichnet wird.

Der Fokus des Projekts bleibt nicht auf die dramatische Dichtung des 16. Jahrhunderts beschränkt, sondern bezieht verschiedene Textsorten und Autoren mit ein, wie zum Beispiel politische Schriften Martin Luthers oder Lieder, Büchlein und Traktate unbekannter Autoren aus dem 16. und 17. Jahrhundert bis hin zu Reiseberichten aus dem 19. und 20. Jahrhundert, darunter auch die Berichte von Ida Hahn-Hahn und Armin T. Wegner.

### Öffentlichkeitsarbeit und Netzwerk

Die inhaltliche Arbeit des türkisch-deutschen Forschungsprojekts in Paderborn wird von weiteren Aktivitäten flankiert, die innerhalb der bilateralen Zusammenarbeit ein hohes Maß an Forschungsaktualität sicherstellen sollen. Bereits im Dezember 2009 fand an der Universität Paderborn das Graduiertenkolloquium „Interkulturelle Konstellationen im türkisch-deutschen Kontext“ statt, in dessen Kontext

internationale Nachwuchswissenschaftler ihre Arbeitsvorhaben zu türkisch-deutschen Themen vorgestellt haben und die im Austausch mit erfahrenen Wissenschaftlern (Şeyda Ozil, Michael Hofmann, Norbert Mecklenburg, Zehra İpşiroğlu, İnci Dirim) diskutiert wurden und Gelegenheit zur Vernetzung der internationalen Nachwuchsforschung zu türkisch-deutschen Themen bot (2011 ist die Fortsetzung des Graduiertenkolloquiums in Istanbul geplant). Diese Vernetzung wurde im Oktober 2010 auf der internationalen Fachkonferenz „Türkisch-Deutscher Kulturkontakt und -transfer: Kontroversen und Lernprozesse“ in Istanbul fortgeführt. Das Projekt ist erfolgreich in der Öffentlichkeit wirksam, so etwa im Rahmen der Paderborner Veranstaltung „Erlesenes bei Tag und Nacht 2010“, wo im Rahmen eines literarischen Salons türkische und deutsch-türkische Literatur dargeboten wurde. Darüber hinaus präsentierte sich das Projekt auf verschiedenen Fachtagungen sowie auf dem Tag der offenen Tür der Universität Paderborn (2010). Ein weiterer Austausch mit der Stadt Paderborn und verschiedenen Interessengruppen außerhalb und innerhalb der Universität wird von unserem Projekt mit dem Ziel angestrebt, die Konsolidierung der türkisch-deutschen Kultur und damit der kulturellen Minderheit in unserem Land voranzutreiben.

### Literatur

ADELSON, LESLIE A., AGAINST BETWEEN – EIN MANIFEST GEGEN DAS DAZWISCHEN. AUS DEM AMERIKANISCHEN VON KARIN E. YEŞILADA. IN: TEXT UND KRITIK. ZEITSCHRIFT FÜR LITERATUR. SONDERBAND (2006). H. 9. S. 36–46.

ÇIL, HASAN, ANFÄNGE EINER EPOCHE. EHEMALIGE TÜRKISCHE GASTARBEITER ERZÄHLEN. BERLIN: HANS SCHILLER 2003.

DEMIR, TAYFUN (HG.), TÜRKISCHDEUTSCHE LITERATUR. CHRONIK LITERARISCHER WANDERUNGEN. DUISBURG: DIALOG EDITION 2008.

HOFMANN, MICHAEL, INTERKULTURELLE LITERATURWISSENSCHAFT. EINE EINFÜHRUNG. PADERBORN: W. FINK 2006.

KLEINLOGEL, CORNELIA, EXOTIK – EROTIK. ZUR GESCHICHTE DES TÜRKENBILDES IN DER DEUTSCHEN LITERATUR DER FRÜHEN NEUZEIT (1453–1800). FRANKFURT A. M.: LANG 1989.

ŞENOCAK, ZAFER, ÜBERGANG. AUSGEWÄHLTE GEDICHTE. 1980–2005. MÜNCHEN: BABEL 2005.

YEŞILADA, KARIN, TÜRKISCHDEUTSCHE LITERATUR. IN: TÜRKISCHDEUTSCHE LITERATUR. HRSG. VON TAYFUN DEMIR. DUISBURG: DIALOG EDITION 2008. S. 11–15.



Das Projektteam Paderborn (v. l.): Prof. Dr. Michael Hofmann, Inga Pohlmeier, Vanessa Potthoff M. A., Helena Platte M. A., Tobias Zenker M. A. und Dr. des. Karin Yeşilada.

### Kontakt

**Prof. Dr. Michael Hofmann**

**Fakultät für Kulturwissenschaften**

**Institut für Germanistik und Vergleichende  
Literaturwissenschaft**

**05251 60-2891**

**MHofmann@zitmail.upb.de**

**Homepage des Projekts**

**<http://www.uni-paderborn.de/dtp>**

# Ein traumhaftes Buch: Die Hypnerotomachia Poliphili

## Ein Albtraum für den Übersetzer?

Prof. Dr. phil. Rafael Arnold

Bei dem fast fünfhundert Seiten starken Renaissance-Roman *Hypnerotomachia Poliphili* von Francesco Colonna handelt es sich um eine Traumerzählung, in der der Protagonist und Ich-Erzähler Poliphilo (Poliphil) seinen Kampf mit der Liebe und um die Liebe schildert. Der Roman wird jetzt zum ersten Mal auf Deutsch erscheinen.

Berühmt geworden ist dieses Buch, das 1499 in Venedig bei Aldus Manutius erschienen ist, vor allem wegen der zahlreichen Holzschnitte und der drucktechnischen Qualität und typografischen Schönheit. Über den Verfasser des Romans wird bis heute gerätselt und gestritten. Ein gewisser Francesco Colonna gilt als der wahrscheinlichste Kandidat, doch zur Entstehungszeit des Buches gab es mindestens zwei Personen dieses Namens, die in Frage kommen: ein Mönch aus Venetien und der Spross einer der einflussreichsten römischen Adelsfamilien, der Colonna. Obwohl zu seiner Entstehungszeit von vielen Buchliebhabern hoch geschätzt und inzwischen in mehrere europäische Sprachen (Französisch, Englisch, Niederländisch, Spanisch) übersetzt, stand eine deutsche Übertragung des Romans bislang noch aus. Das hier vorzustellende Projekt wird vom Italienischen Kultusministerium unterstützt.

Bereits der Titel stellt für den Übersetzer eine gewisse Herausforderung dar, denn die Wortzusammensetzung *Hypnerotomachia*, lässt sich zwar leicht in ihre drei griechischen Bestandteile zerlegen und einzeln übersetzen, nämlich als „Schlaf“ (*hypnos*) – „Liebe“ (*eros*) – „Kampf“ (*máche*), und auch der sprechende Name des Protagonisten lässt sich zergliedern in „viel“ (*poli*) und „Liebender“ (*philos*), doch ist damit noch keine griffige Übertragung gelungen. Inzwischen hat sich in deutschen Texten über das Werk „Der Liebeskampftraum des Poliphilo“ als Titel so eingebürgert, dass die Entscheidung, ihn zu wählen, leicht fällt. Bevor im Folgenden eingehend von den sprachlichen Besonderheiten und insbesondere von den Übersetzungsschwierigkeiten, die der Text bietet, die Rede sein wird, soll zunächst der Inhalt in Kürze wiedergegeben werden.

### Ausgangspunkt der Erzählung und kurze Wiedergabe des Verlaufs

Der Beginn der Erzählung ist, wie schon in Dantes Göttlicher Komödie, in einen dunklen, dichten Wald verlegt, der als Sinnbild seelischer Verwirrung und Orientierungslosigkeit dient. Hier liegt der Ausgangspunkt von Poliphils „Bildungsreise“. Er erzählt, wie er im Traum auf der Suche nach seiner Geliebten Räume und Landschaften durchmisst, die er den



Prof. Dr. phil. Rafael Arnold hat den Lehrstuhl für Romanische Sprachwissenschaft an der Universität Rostock inne. Er war von 2004–2010 als Juniorprofessor in Paderborn tätig. Er ist Herausgeber und Mitübersetzer des portugiesischen Nationaldichters Luís de Camões (1524/25–1579/80). Seine Forschungsgebiete sind Sprachgeschichte der romanischen Sprachen (insbesondere der Renaissance), Lexikologie und Lexikographie sowie das Judenspanische/Ladino.

Lesern minutiös schildert. Dabei sind drei Gruppen der beschriebenen Realia besonders zu erwähnen, weil sie auf seiner Traumwanderung wiederholt auftauchen und so eine Konstante in der schier unübersichtlichen Fülle der geschilderten Dinge darstellen, nämlich Architektur, Botanica und die Welt der Nymphen.

Schließlich trifft Poliphil seine angebetete Polia. Damit scheint sein Weg zu Ende, doch nun schreiten die beiden gemeinsam weiter fort zur wahren Liebe (*purus amor*). Zusammen gelangen sie auf die Insel Kythera, wo sich, im Tempel der Venus ihre Liebe vollendet. Damit endet der erste Teil des Buches.

Allerdings erfolgt am Ende des Buches die Aufforderung der Nymphen, Polia solle ihre Geschichte und die Gründe ihrer glücklichen Liebe erzählen. Damit ist der Übergang zum zweiten Buch geschaffen, in dem zunächst Polia das Wort hat. Anschließend kommt Poliphil nochmals zu Wort und berichtet von seinem Scheintod, vom Flug seiner Seele und davon, dass er sich beim Erwachen in Polias Armen wiederfand. Als Poliphil und Polia sich schließlich küssen und sich mystice vereinigen, verflüchtigt sich Polias Ebenbild. Ernüchtert und enttäuscht erwacht Poliphil aus seinem Traum. Mit dem Aufwachen wird gewissermaßen eine Klammer geschlossen, die auf den ersten Seiten geöffnet wurde, als der Erzähler einschlief, um im dunklen Wald zu erwachen, und durch die die ganze Erzählung als Wiedergabe eines Traumes qualifiziert wird. Das Buch endet in der „wirklichen Welt“ und nennt den Erzähler einen Elenden („misellus Poliphilus“), weil er noch immer unter der unerwiderten Liebe zu Polia leidet.

### Die Illustrationen der Hypnerotomachia Poliphili

Die überwiegende Anzahl der Holzschnitte, derentwegen die



Abb. 1: Poliphil in der „selva obscura“ – dem finstren Wald (Holzschnitt aus *Hypnerotomachia Poliphili*).

*Hypnerotomachia Poliphili* auch als das „schönste Buch der Renaissance“ (Julius von Schlosser) bezeichnet wurde, stellt genau das dar, wovon der Text berichtet. Sie illustrieren also im Text Beschriebenes, man könnte auch sagen, sie repräsentieren visuelle Wahrnehmungen des Träumers. Dazu zählen die Darstellungen narrativer Szenen wie die Wanderung durch den finstren Wald (Abbildung 1). Andere zeigen Dinge, die dem Erzähler als solche im Traum vor Augen standen: Artefakte wie Architekturfragmente oder andere *objets trouvés*, z. B. Grabplatten oder Inschriften, die der Text dann abschildert (Abbildung 2). Im Holzschnitt stehen sie dem Leser bildlich vor Augen. Das Prinzip dieser Dopplung von Text und Bild scheint vor der Drucklegung festgestanden zu haben und essenziell zur intermedialen Konzeption des Werks zu gehören. Das Bildprogramm der *Hypnerotomachia Poliphili* und seine Rätsel, die nicht nur für die Emblemata-Forschung und die Kunstgeschichte von großem Reiz sind und Anlass zu einer enormen Menge von Fachliteratur gegeben haben, stehen hier indes nicht im Mittelpunkt.

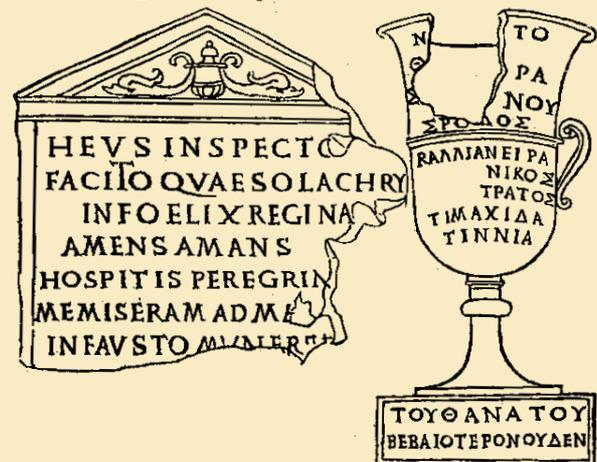
### Die Sprache der *Hypnerotomachia Poliphili* und ihre Übersetzung

Die sprachlichen Besonderheiten (und Schwierigkeiten) der *Hypnerotomachia Poliphili* mögen ein Grund dafür sein, dass der Roman bis heute nicht ins Deutsche übertragen worden ist. Im Folgenden sollen einige der auffälligsten sprachlichen Mittel kurz dargestellt werden. Neben der Verwendung eines oftmals archaischen Italienischs und vieler Latinismen, griechischer und sogar – in geringer Anzahl – hebräischer Wörter fällt im Bereich der Lexik besonders der Fachwortschatz verschiedener Wissensgebiete auf. Der Satzbau imitiert oft die freie Wortstellung des Lateinischen, was die Lektüre nicht einfach macht. Beim Übersetzen stellt sich nun die Frage, ob man vereinfachen und modernisieren möchte, wofür sich beispielsweise Joscelyn Godwin (1999) bei der englischen Übertragung entschieden hat und damit den Stil des Buches völlig preisgibt. Ein anderes Extrem wäre es, wenn der Übersetzer auf die Idee käme, etwa einen „lutheri-

schen Stil“ oder den eines Grimmelshausen anzustreben, und durchgehend Wörter wie „sintemalen“, „fürbaß“ und „anitzo“ zu verwenden. Das würde die historische Sprachstufe zwangsläufig doch verfehlen und zu einer karikierenden Übersetzung führen. Hier muss beim Übersetzungsvorgang eine Balance gefunden werden. Umberto Eco spricht in ähnlichem Zusammenhang von einer „Verhandlung“ mit dem Originaltext. Es genügt, hier und da eine ältere Wortform oder eine veraltete Bezeichnung einzufügen, um den antikisierenden Stil des Originals auch in der Übersetzung durchschimmern zu lassen und ihm dadurch gerecht zu werden.

Einfacher fällt die Übersetzung der Fachausdrücke, wofür zahlreiche Bild- und Fachwörterbücher zur Architektur, Pflanzen- und Vogelkunde usw. verfügbar sind. Allerdings stellt sich die Frage, ob der Leser weiß, was der Fachmann mit „Architrav“, einer „Plinte“ oder einem „Epistyl“ bezeichnet, oder ob er den Unterschied zwischen einer Rot-, Blut- und einer Hainbuche kennt. Colonna verwendet einen schier unerschöpflichen lexikalischen Vorrat, z. T. in Form von Namenslisten, Aufzählungen von Pflanzen, Tieren oder architektonischen Elementen. Ganze Wortfelder, die einem Synonymwörterbuch entnommen scheinen, werden gewisser-

palmitro. Nelqle in una facie, dal fröte dila fractura era iscrpto, & si-  
milméte oue era rupto p idicio di alcune litere pte fragméate, & itegre,  
parte rimaste. Poscia nella subiecta corpulétia dalla circinante cinctura  
uerso el fondo, nellaquale erano appaete leanfe, nel fronte dilla fra-  
ctura era questa prazante scriptura.



Relicti questi rupti monumenti, ad una destructa tribuna deue-  
ni nellaquale alquanto fragmento di museaco si comprendea. Oue  
picta mirai uno homo affligente una damicella. Et uno naufragio. Et  
uno adolescétulo sopra il suo dorso equitante una fanciulla, nataua ad  
uno littore deserto. Et parte uedeuasi di uno leone. Et quegli dui in una  
nauicula remiganti. Il sequente destructo. Et ancora questa parte era in  
molti lochi lacerata. Non ualeua intendere totalmente la historia. Ma  
nel pariete crustato marmoreo, era intersepta una tabula aenea, cum ma-  
iulcule graecae. Tale epigramma inscripto hauea. Ilquale nel pro-  
prio Idiomate in tanta pietate me prouocaua legendo  
si miserando caso, che di lachryme conte-  
nime non potui, danando la rea for-  
tuna. Ilquale sapiculae perle-  
gendo, quanto io ho  
potuto culsi il fe-  
ce latino.

Abb. 2: Fragmente von Grabinschriften und antiken Gefäßen (Holzschnitt aus *Hypnerotomachia Poliphili*).



Et postala nella sua, stringerla lentiua tra calda neue, & in fra coagulo lacteo. Et parue ad me imo cusi era de artingere & attrètare pur altro che cosa di còditione humana. La onde polcia che cusi facto hebbi, iretai tutto agitato & concusso, & suspicoso, non itédando le cose inuisitate ad gli mortali. Ne ancora che dindi ne douesse sequire, cum plebeo habito panoso, & cù ilciocchi & uulgari costurni, difforme allei istimantime inepto & dissimile di tale còsortio, & illicito essere mortali & terrogenio tale delitie fruire. Per laqle cagione arrosciatia la faccia, tutto diuerecudà admiratiõe reimpleto, al quãto della mia imitate còdolédomi, sectario suo me exposi.

Vltimamète pur nõ cum integro & tutto riuocato animo icominciai de ridurre gli pauidi & prurbati spiriti, Suadédomi meritamète beatissimo exito essere appresso tale bellissimo & diuio obiecto, & in cusi facto loco. Laspecto prastabile della quale ualida uirtute harebbe hauuto di trahere & di transmigrare le perdute alme fora delle eterne flamme, & deridure gli corpi icòpacti negli monumèti al suo còiuncto, Et bacho hareb be neglecto la iclyta temulètia di Gaurano, Fausiano, & Falerno, & Puci-

Abb. 3: Versteckte Erregtheit (Holzschnitt aus *Hypnerotomachia Poliphili*).

maßen abgegrast. Wo es sich nicht um symboltragende Pflanzen (Rosen oder Lilien) handelt, scheint der Übersetzer eine gewisse Freiheit zu besitzen, solange er die Fülle und Vielfalt der Flora und Fauna bewahrt. Die exakte biologische Bestimmung scheint nämlich nicht das Ziel des Verfassers gewesen zu sein, zumal auch Namen von Tieren und Pflanzen auftauchen, die bis heute von der Forschung nicht identifiziert werden konnten und möglicherweise vom Autor erfunden wurden.

Ein weiteres typisches Merkmal des Textes ist, dass häufig Synonymketten von zwei-, drei- oder vielgliedrigen sinnverwandten oder synonymen Bezeichnungen auftreten. Vom Herzen Polias heißt es an einer Stelle:

(deutsch:) *Ihr Herz verhärtete sich noch mehr, blieb unberührt, unbezähmt, ungerührt und schroff wie Stein.*

Oder an anderer Stelle, wo Poliphils Seele die Auswirkungen der Liebe schildert:

(deutsch:) *Durch die Liebe zu der grausamsten Dame wurde ich herumirrend und unstet, wie ein Flüchtling, Fremdling, der die Ruhe nicht mehr findet.*

Synonymkombinationen führen einerseits zu einer besseren, präziseren Bestimmung des Gegenstandes oder der Gefühlsregung, der sie zugeordnet sind, also zu einer definitiven Einkreisung. Zugleich bergen sie aber auch die Gefahr,

dass durch Überdeterminierung der gegenteilige Effekt hervorgerufen wird, dass das Determinierte gewissermaßen atomisiert wird und man, in anderen Worten, den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr sieht.

### Die sprachlichen Grenzen der Ausdrucksfähigkeit und Darstellbarkeit

Während die präzisen Aufzählungen pflanzlicher oder architektonischer Details die Glaubwürdigkeit der Darstellung und den Eindruck von der „Echtheit“ des Dargestellten erwecken sollen, erfüllen die Synonymhäufungen diesen Zweck nur zum Teil. Das Zuviel an Informationen bringt die im Traum wahrgenommenen Dinge in einen oszillierenden Flimmerzustand, der ihre eindeutige Existenz und wahre Wirklichkeit zugleich auch wieder in Frage stellt. Grenzen werden somit aufgelöst. Was formal geschieht ist mithin eine zum Inhalt gegenläufige Bewegung, die zum Gegenteil von Definition führt, indem Grenzen aufgeweicht werden. Das Resultat ist vielmehr eine Diffusität, eine entgrenzte Unbestimmtheit. Ein traumhaftes Ungefähr.

Auch die Grenzen der Sprache selbst, also des Mediums, mit dem das im Traum Erlebte und Gesehene beschrieben wird, werden zuweilen erreicht und zuweilen sogar überschritten. Wo dem Autor die Worte fehlen, schafft er neue, indem er sie von vorhandenen ableitet oder er versucht, das zu Sagende durch eine Häufung synonyme oder quasi synonyme Wörter anzudeuten, die lexikalische Leerstelle quasi zu umkreisen und zu minimieren, indem er den Erkenntnisfokus des Lesers durch die Nennung der Synonyme schärft und auf die Leerstelle lenkt. – Diese Kreativität hat dem Buch indes auch Gegner gebracht, denen diese Wortbildungen zu künstlich erscheinen. – Hier ging es in der Übersetzung darum, durch analoge Wortbildungen dem Original möglichst nahe zu kommen, um die Eigenart des Textes zu bewahren. Die vielen phantasiereichen Wortbildungen lassen sich nämlich nicht nur im Sinne einer funktionalen Sprachverwendung verstehen; sie erfüllen gewissermaßen auch einen Selbstzweck und sind mithin Ausdruck von Glottophilie (oder Sprachliebe), die Sprache bildet, schöpft und mit ihr spielt. Dabei nähert sich der Autor auch wieder den Grenzen der Sprache, indem er die Verwendung der oben genannten Worthäufungen ins Extreme führt, wenn er die semantisch-lexikalischen Cluster numerisch zu sieben-, acht- oder neungliedrigen Ketten erweitert, beispielsweise, wenn er Poliphil die Venus-Priesterin, der er die Geschichte seines Leidens schildert, folgendermaßen um Hilfe bitten lässt:

[...] wenn es Dir möglich ist, das Böse zu zerstreuen, abzuwenden, aus dem Weg zu räumen, das Gute zu fördern, die untersten und niedrigsten Dinge zu erheben, die schwankenden aufzurichten und zu stützen, die dunklen zu erleuchten und die entgegenstehenden von Fehlern zu berichtigen und sie zu verbessern [...].

Die häufig anzutreffende Verwendung des Komparativs deutet zusätzlich auf eine Steigerung der Qualitäten und Quantitäten. Sie bedeutet ein Mehr gegenüber der üblicherweise wahrgenommenen Realität. Und die noch häufigere Anwendung von Superlativen verweist auf eine äußerste



Abb. 4: Polia und Poliphil in Liebe vereint (Holzschnitt aus *Hypnerotomachia Poliphili*).

Grenze, an ein nicht zu Übertreffendes. Denn eigentlich gibt es kein Größeres als das Größte, kein Höheres als das Höchste. Wenn diese Superlativformen dann auch noch in immer kürzeren Abständen auftauchen, wie in dem folgenden Beispiel: „furacissimi [...] dulcissimo [...] largissima [...] bellissime [...] pretiosissime [...] praelucentissime [...] purgativissimo [...] decentissimamente“ – auf einer einzigen Buchseite –, erzeugt dies eine Art von Taumel, wie er ekstatischen Zuständen vorausgehen soll und in mystischen Texten häufig – mit eben diesen Mitteln – beschworen wird. Im Deutschen ist eine solche Häufung von Superlativformung stilistisch allerdings noch schwerer als im Italienischen zu ertragen, da sie zwangsläufig zu Kakophonie durch Konsonantenhäufung führt (*räuberischste ... süßester ... weiteste ... schönsten ... kostbarsten ... glänzendsten ... lautersten ... aufs Zurückhaltendste*).

Der Autor treibt diese Steigerung schließlich in der Formel „il piu singularissimo amore“ sprachlogisch auf die Spitze, indem er das Adjektiv „singolare“ (einzig, einzigartig), das etwas Absolutes bezeichnet, mittels lateinischem Steigerungssuffix „-issimo“ superlativisch steigert und auch noch mit der im Italienischen üblichen Superlativbildung durch vorangestelltes „il più“ kombiniert (auf Deutsch etwa: *die allereinigartigste Liebe*).

Eine weitere sprachliche Strategie des Autors, die Einmaligkeit einer Sache zu betonen, besteht darin, zu verneinen, dass man sie überhaupt adäquat beschreiben könnte. Das heißt, er beschreibt den Sachverhalt *ex negativo*. An erster Stelle steht dabei das Negationspräfix in- (deutsch un-); Wörter wie: *unschätzbar, unzählig, unvergleichlich, unerhört, unvorstellbar* gehören dazu. Von vielen Dingen sagt der Erzähler, dass sie *unaussprechlich* oder *unbeschreibbar* seien, womit er sich bereits jenseits des Zählbaren, Vergleichbaren, Vorstellbaren befindet. Und nicht nur ihm persönlich versagt die Sprache, sagt der Ich-Erzähler, auch der Beredetste wäre seines Erachtens zum Scheitern verurteilt. Hier wird also ein Wahrnehmungsfeld angedeutet, für das es keine Worte gibt.

Worüber man aber nicht sprechen kann, darüber muss man

schweigen. So behauptet der Ich-Erzähler, dass man der Schönheit und Kunstfertigkeit eines angetroffenen Venus-Brunnens nur schweigend die verlangte Würde widerfahren lassen könnte.

Diese Feststellungen sind keineswegs Ausreden eines plötzlich redefaul gewordenen Erzählers, sondern im Gegenteil: Gerade diese Aussparungen beschwören äußerst effektiv eine Übersprachlichkeit (ein *aldilà della lingua*), die nur im Schweigen aufgehoben werden kann. Der Autor lässt seinen Poliphil die besondere Erfahrung machen, über das hinauszugelangen, was den Menschen sonst zugänglich ist und das zu schauen, was das menschliche Fassungsvermögen übersteigt. – Ironischerweise wendet sich Poliphil, nachdem er aus dem ekstatischen Traum von der mystischen Vereinigung erwacht ist, mit folgenden Worten an die Leser:

(deutsch:) *Urteilt selbst, ob ich das körperliche Verlangen und Vergnügen mit dieser so schönen und göttlichen jungen Dame und berühmten Nymphe wirklich geteilt habe.* [Herv. R.A.].

Der Bereich des Unfassbaren, des Unerzählbaren, des Mysteriums kann sprachlich nur gestreift oder umkreist werden. Das außerhalb des sprachlich Fassbaren Liegende, kann dadurch sprachlich bewältigt werden, dass es als Negation der Realität, eben als Etwas, das nicht diesseits der Grenzen liegt, beschrieben wird (vgl. Agamben 2008). Die Grenze zu überschreiten, wagt der Erzähler nicht. Er spricht das Unausprechliche (*l'indicibile*) an, aber nicht aus. Mittels Verneinung kann es sprachlich verortet werden (vgl. Derrida 1987). So gelingt es Colonna mit seiner mystischen sprachverliebten und Sprache überwindenden Erzählung vom Traum des Poliphil Ekstase und Mysterium umkreisend zu beschreiben.

### Funktionen der Liebe in erzähltechnischer Hinsicht

In dem Moment, in dem die Traumerzählung einsetzt, ist der Ich-Erzähler bereits verliebt. Diese Liebe treibt ihn an, die Geliebte zu suchen, sich auf den Weg zu machen. Die Frage, ob Poliphil seine Polia wiedersehen wird, und die Frage nach dem Ursprung dieser Liebe stacheln die Wissbegierde des Lesers an, fungieren also gleichsam als Motor des Erzählens und geben besonders dem ersten Teil des Buches seine lineare, teleologische Struktur.

Dem Weg aus dem finstren Wald in immer lichtere Sphären entspricht das allmähliche Heraustreten eines „verworfenen Menschen“ aus einem anfangs kreatürlichen, tierhaften Dasein, das dem eines triebhaften Tieres ohne Verstand gleicht, in den geläuterten Zustand des wahren Menschseins (*humanitas*). Der Übergang von dem einen Zustand in einen neuen wird mit einer ganzen Reihe von Lexemen aus dem Wortfeld „verwandeln“ beschworen. Aus einer ursprünglichen Unförmigkeit (*deformitate*), die die Unvollkommenheit und fehlende moralische Haltung plastisch beschreibt, wird der Suchende zu neuer Form umgestaltet.

Der Kern dieses allegorischen Romans ist die Liebe, die jene Umwandlung ermöglicht. Poliphil vermag den Zeitpunkt, an dem seine Liebe sich entzündete, genau festzumachen. Er

wird auf das Jahr 1462 datiert, als er Polia auf einem Balkon stehen sah. Wortreich werden die nun einsetzenden Folgeerscheinungen der Liebe geschildert. Von ihrer Schönheit gebannt, kennt Poliphil nur noch das Verlangen, sie wiederzusehen und ihr nahezukommen. Durch die abweisende Haltung Polias und seinen andauernden Misserfolg im Werben um ihre Gunst und Liebe wird Poliphil allmählich liebeskrank (*aegrotus amoris*). Er hält sich für den Unglücklichsten aller Liebenden (*infelice amante scencia pare*), doch zugleich erfüllt ihn die Einzigartigkeit dieser Liebe mit Stolz: (deutsch:) [...] *dass ich für dich die größte und allereinigste Liebe hege, die je ein Liebender auf dieser Welt für eine Frau hegte.*

Polia hingegen ist zunächst vollkommen ungerührt und abweisend. Erst nach Poliphils vermeintlichem Tod und sich anschließend bei ihr einstellenden Albträumen bekommt sie Gewissensbisse. Allmählich begreift sie, dass sie gegen Amors Gesetze verstoßen hat und durchläuft einen Veränderungsprozess, an dessen Ende sie mit neuen Eigenschaften erscheint. Nun spürt auch Polia körperliches Verlangen nach Poliphil. Die Liebe vollendet sich in dem Moment, in dem sie auf Gegenseitigkeit (*mutuo amore*) beruht. Diese Wechselseitigkeit ist Voraussetzung für das Einswerden der beiden Liebenden, das durch die Macht der Liebesgöttin verwirklicht wird. Die Liebe, die hier Ewigkeit will und verspricht, wird jedoch beim Erwachen Poliphils herb enttäuscht. Sie endet also mit dem Traum und als Traum. Und endet doch nicht, weil sie in Poliphil weiter, wenn auch unerwidert, wirkt. Eine eindeutige Antwort auf die Frage, wo diese Liebe aufhört, gibt es, im Gegensatz zu der Frage, wann und wo sie begonnen hat, nicht.

Die wichtige Rolle, welche die visuelle Wahrnehmung, die sich in den ausführlichen Beschreibungen der Traumwelt niederschlägt, für die beiden Liebenden hat, hat sie auch für denjenigen, der die Dinge „richtig sehen“ will. Der Blick hinter die Erscheinungen der Welt, das Erkennen dessen, was über ihr oder jenseits von ihr liegt, wird in dem Verb „travedere“ gefasst, das „hindurchschauen“ bedeutet. Dazu taugen menschliche Sehorgane alleine nicht. *Transvedere* meint, über die ablenkenden Verführungen der sinnlichen Welt und des körperlichen Begehrens hinauszublicken. Die mystische Qualität des Lexems „cernere“ wird an vielen Stellen betont.

Der Kampf, der im Titel des Buches genannt ist, meint also zugleich physische wie psychische Anstrengung, mittels derer ein Gleichgewicht zwischen Naturhaftigkeit und Tugend hergestellt werden soll. Aus der Dunkelheit gelangt der menschliche Geist durch Erleuchtung ins Licht; von der Materialität zur psychischen Immaterialität – vorangetrieben durch die Kraft der Liebe.

Zu den hervorstechenden Charakteristika der *Hypnerotomachia Poliphili* gehört – und das darf nicht unterschlagen werden –, dass der Erzähler die körperlichen Aspekte der Begierde sehr explizit nennt. Seine Liebe zum Detail *in eroticis* ist absolut bemerkenswert, wengleich die Holzschnitte davon nur wenig erahnen lassen (Abbildung 3 und 4).

Seine Traumerzählung gerät Poliphil zur Bewusstwerdung

der eigenen erotischen Psychomachie. Die detailgetreue Beschreibung von allem, was ihm im Traum begegnete, dient als Voraussetzung für die Entzifferung der eigenen mysteriösen Verwandlung. Sie ist zugleich rekapitulierende *memoria* und *analysis* des Ich-Erzählers – verwirklicht mit der Liebe zur Sprache, deren Grenzen erreicht, benannt und *ex negativo* überwunden werden. Diese Transzendenz auch im Deutschen nachvollziehbar abzubilden, ist, neben der Genauigkeit und stilistischen Angemessenheit, eine der Forderungen an eine angemessene Übersetzung. Angemessen ist sie aber nur, wenn der Übersetzer die oben erwähnte „Verhandlung“ mit dem Original sorgfältig geführt hat. Das Übersetzen dieses Buches ist aber bei aller Herausforderung, die besonders die analoge Wiedergabe der eigenwilligen Wortbildungen und die massenhaften Fachtermini darstellen, kein Albtraum. Auch wenn das Ergebnis nie eine vollkommene Übersetzung sein kann, ist es hoffentlich eine, die vielfältige Facetten und unterschiedliche Ebenen des Originals in der Zielsprache zugänglich macht und dem Buch möglichst viele Leser erschließt.

Textausgabe: Francesco Colonna, *Hypnerotomachia Poliphili*. Riproduzione ridotta dell'edizione aldina del 1499. Introduzione, traduzione e commento di Marco Ariani e Mino Gabriele, 2 voll., Milano, Adelphi Edizioni, 1998.

Englische Übersetzung: Joscelyn Godwin (Trans.): *Hypnerotomachia Poliphili*. The strife of love in a dream, London 1999.

Die deutsche Übersetzung von Rafael Arnold wird im Elfenbein-Verlag Berlin erscheinen.

### Literatur

GIORGIO AGAMBEN, IL SOGNO DELLA LINGUA: PER UNA LETTURA DI POLIFILO, LETTERE ITALIANE 34,4 (1982), S. 466–481.

GIORGIO AGAMBEN, IL LINGUAGGIO E LA MORTE. UN SEMINARIO SUL LUOGO DELLA NEGATIVITÀ, TORINO, EINAUDI, 2008.

JACQUES DERRIDA, COMMENT NE PAS PARLER: DÉNÉGATIONS, IN (DERS.): PSYCHÉ: INVENTIONS DE L'AUTRE, PARIS: GALILÉE 1987, S. 535–595.

UMBERTO ECO, QUASI DASSELBE MIT ANDEREN WORTEN. ÜBER DAS ÜBERSETZEN, MÜNCHEN: DTV 2009 [ORIG.: DIRE QUASI LA STESSA COSA. ESPERIENZE DI TRADUZIONE, MILANO 2003].

### Kontakt

Prof. Dr. phil. Rafael Arnold,  
seit Oktober 2010 Universität Rostock  
[rafael.arnold@uni-rostock.de](mailto:rafael.arnold@uni-rostock.de)

# UNI Paderborn

Heute noch Schule ...

MINT

Mathematik

Informatik

Naturwissenschaften

Technik

... morgen schon MINT

[www.uni-paderborn.de/mint-studieren](http://www.uni-paderborn.de/mint-studieren)

- ▶ MATHEMATIK
- ▶ INFORMATIK
- ▶ CHEMIE

- ▶ PHYSIK
- ▶ ELEKTROTECHNIK
- ▶ MASCHINENBAU



UNIVERSITÄT PADERBORN  
Die Universität der Informationsgesellschaft

# Raul zu Schalke, Özil und Khedira zu Madrid

## Die Globalisierung des Arbeitsmarktes für Fußball-Profis

Prof. Dr. rer. pol. Bernd Frick

In seiner als „Bosman-Urteil“ bekannt gewordenen Entscheidung hat der Europäische Gerichtshof (EuGH) am 15. Dezember 1995 mit Verweis auf die durch Art. 48 EWG-Vertrag garantierte Freizügigkeit der Arbeitnehmer die Zahlung einer Transferentschädigung beim Vereinswechsel eines Fußballspielers nach Ablauf seines Vertrages untersagt und zugleich die in den meisten europäischen Ligen bis dahin praktizierte Begrenzung der Zahl an ausländischen Spielern für unzulässig erklärt. Während die Konsequenzen des Verbotes von Ablösezahlungen in einer Reihe



Quelle: Imago

Abb. 1: Raul und Jan-Klaas Huntelaar: Die „große weite Welt“ ist im Revier angekommen.



Prof. Dr. rer. pol. Bernd Frick ist seit Juli 2007 Inhaber des Lehrstuhls für Organisations- und Medienökonomie in der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und seit Januar 2008 Vizepräsident für Planung, Finanzen und internationale Beziehungen. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Personal- und Organisationsökonomie, industrielle Beziehungen sowie Sport- und Medienökonomie.

von Arbeiten sowohl theoretisch<sup>1</sup> als auch empirisch<sup>2</sup> untersucht wurden, ist der Einfluss des Urteils auf die internationale Spielermobilität bislang kaum analysiert worden. Dies ist insofern überraschend, als dieser Aspekt der Gerichtsentscheidung vielfach für die „(zu) starke“ Zunahme des Anteils ausländischer Spieler in den Top-Ligen in Westeuropa (England, Italien, Spanien, Frankreich und Deutschland) verantwortlich gemacht wurde.

Dass die Spielermobilität sowohl vor als auch nach dem Bosman-Urteil im Anschluss an die beiden bedeutendsten Turniere – die alle vier Jahre stattfindenden Fußball-Europa- und Weltmeisterschaften – jeweils erheblich zunimmt, ist wenig überraschend, denn Spieler aus Osteuropa, aus Afrika und zuletzt auch aus Asien und Ozeanien nutzen die „Fußballbühne“, um sich für ein Engagement in einer der europäischen Top-Ligen zu empfehlen. Welchen Einfluss Auftritte auf dieser Bühne auf den „Marktwert“ der Spieler – und damit auf ihr Gehalt – haben, ist bislang ebenfalls nicht detailliert untersucht worden.

Vor diesem Hintergrund verfolgt der vorliegende Beitrag eine doppelte Zielsetzung: Zum einen geht es darum, den Einfluss des Bosman-Urteils auf die internationale Mobilität von Nationalspielern zu quantifizieren. Dazu wird der Anteil der von den jeweiligen Nationaltrainern in die für die WM-Turniere 1978 bis 2010 und die EM-Endrunden 1976 bis 2008 qualifizierten Auswahlmannschaften berufenen Spieler ermittelt, die zum Zeitpunkt des Turnierbeginns nicht bei einem Club ihres Heimatlandes unter Vertrag standen und untersucht, ob der „Exilantenanteil“ einen Einfluss auf die sportliche Performance bei dem jeweiligen Turnier hat. Zum anderen wird unter Verwendung geeigneter Daten aus dem „Kicker-Managerspiel“<sup>3</sup> der Einfluss von Länderspieleinsät-



Quelle: Imago

Abb. 2: Mannschaft Chelsea London: kulturelle Heterogenität als „Erfolgsgarant“.

zen bei einer Europa- oder Weltmeisterschaft auf den Marktwert der Spieler bei gleichzeitiger statistischer Kontrolle anderer (potenzieller) Determinanten des Marktwertes ermittelt.

**Die vermeintlichen und die tatsächlichen Folgen des Bosman-Urteils**

Die nicht nur in der Fußball-Bundesliga, sondern auch in anderen Fußballligen in ähnlicher Form praktizierte „Ausländerregelung“ erlaubte von 1963/1964 bis 1991/1992 den gleichzeitigen Einsatz von maximal zwei nicht-deutschen Spielern pro Verein, von 1992/1993 bis 1995/1996 waren es deren drei. Am 20. Februar 1996 gab die UEFA die Abschaffung der vom EuGH verurteilten „3+2 Regel“ bekannt, der zufolge die nationalen Verbände die Zahl der im offiziellen Spielbericht des Schiedsrichters aufgeführten Spieler, die nicht für die Nationalmannschaft des betreffenden Landes spielberechtigt sind, in von der UEFA veranstalteten Wettkämpfen zwischen Vereinen des EWR auf drei beschränken mussten.<sup>4</sup> Mit Beginn der Spielzeit 1996/1997 durfte jeder Verein sowohl in der nationalen Meisterschaft als auch in supranationalen Pokalwettbewerben beliebig viele Spieler einsetzen, die aus einem Mitgliedsstaat der UEFA oder aus einem mit der EU assoziierten Staat stammten. Weiterhin konnten maximal drei Spieler aus so genannten „Nicht-UEFA Staaten“ eingesetzt werden. Mit Beginn der Spielzeit 2001/2002 wurde die letztgenannte Obergrenze auf fünf angehoben.

Der Anteil deutscher Spieler in der Fußball-Bundesliga ist

nicht erst seit Beginn der Saison 1996/1997 (der ersten Spielzeit nach dem Bosman-Urteil), sondern bereits seit Mitte der siebziger Jahre rückläufig – seit einer Zeit also, in der die einzelnen Clubs maximal zwei Ausländer gleichzeitig einsetzen durften. In der zweiten Hälfte der achtziger Jahre nahm der Ausländeranteil weiter zu und betrug zum Zeitpunkt des Bosman-Urteils bereits rund 25 Prozent<sup>5</sup>. Danach kam es zu einer erheblichen Beschleunigung der Substitution deutscher durch ausländische Spieler mit der Folge, dass

|         | Mittelwert |         | Mittelwert |
|---------|------------|---------|------------|
| EM 1976 | 10,0       | WM 1978 | 11,4       |
| EM 1980 | 4,5        | WM 1982 | 16,7       |
| EM 1984 | 11,9       | WM 1986 | 21,2       |
| EM 1988 | 26,9       | WM 1990 | 27,1       |
| EM 1992 | 31,6       | WM 1994 | 33,0       |
| EM 1996 | 30,1       | WM 1998 | 42,6       |
| EM 2000 | 46,5       | WM 2002 | 48,2       |
| EM 2004 | 44,3       | WM 2006 | 53,1       |
| EM 2008 | 47,5       | WM 2010 | 59,1       |

Tab. 1: Anteil der zum Zeitpunkt des jeweiligen Turniers im Ausland beschäftigten Nationalspieler.



Quelle: Imago

Abb. 3: Sami Khedira – ein in Stuttgart geborener „Königlicher“ mit nordafrikanischen Wurzeln.

in der Saison 2002/2003 erstmals mehr als 50 Prozent der eingesetzten Spieler aus dem Ausland stammten. Beinahe parallel dazu verlor die deutsche Fußball-Nationalmannschaft international erheblich „an Boden“, was einige (tatsächliche oder vermeintliche) Experten veranlasste, das Bosman-Urteil für die teilweise bescheidene sportliche Performance der Auswahlmannschaft bei den Europameisterschaften 2000 und 2004 verantwortlich zu machen: Der verstärkte „Import“ von Fußballern aus dem Ausland würde die Entwicklung einheimischer Nachwuchsspieler behindern, weil diese der Konkurrenz durch etablierte Profis noch nicht gewachsen seien und aus diesem Grund keine oder bestenfalls geringe Einsatzzeiten erhielten. Umgekehrt würden die Nationen, die in einem nennenswerten Umfang Spieler exportierten, von dieser neuen

„Freizügigkeit“ profitieren, weil sich die Spieler ihrer Auswahlmannschaften nunmehr in den stärksten Ligen der Welt behaupten könnten<sup>6</sup> (siehe Tabelle 1).

Eine Auswertung der jedem Fußball-Fan in Form der entsprechenden Sonderhefte des „Kicker“ zugänglichen Daten macht deutlich, dass der Anteil der zu Beginn des jeweiligen Turniers im Ausland beschäftigten Spieler – wie erwartet – von rund zehn Prozent in den Jahren 1976 bzw. 1978 auf knapp 48 Prozent (EM 2008) bzw. auf 59 Prozent (WM 2010) zugenommen hat (vgl. Tabelle 1), während die Streuung des Anteils der „Legionäre“ erheblich gesunken ist, was darauf hindeutet, dass die Nationaltrainer ähnliche Rekrutierungsstrategien zu verfolgen scheinen.

Die ökonomische Analyse der Daten macht deutlich, dass die internationale Mobilität von Fußball-Nationalspielern bereits vor dem Bosman-Urteil von Jahr zu Jahr zugenommen und dass deren „Wanderungsbereitschaft“ durch eben dieses Urteil auf ein deutlich höheres Niveau befördert worden ist. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang aber auch, dass das Bosman-Urteil wider Erwarten keinen zusätzlichen, die Mobilität beschleunigenden Effekt hatte.

Die Antwort auf die Frage nach dem Einfluss des Anteils von im Ausland beschäftigten Spielern auf die sportliche Performance der Nationalmannschaften fällt ebenfalls eindeutig aus: Unter den sportlich erfolgreichen Auswahlmannschaften befinden sich etwa gleich viele, die kaum Spieler exportieren (u. a. Deutschland, England, Italien und Spanien) oder aber sehr viele Legionäre berufen (u. a. Argentinien, Dänemark, Jugoslawien/Kroatien und Niederlande). Umgekehrt gibt es allerdings auch sportlich vergleichsweise schwache Mannschaften mit einem hohen (u. a. Algerien, Australien und Kanada) bzw. einen niedrigen Anteil (u. a. Chile, Japan, Ecuador) von im Ausland beschäftigten Nationalspielern.

Die Modellschätzungen (vgl. Frick 2009) machen deutlich, dass der Anteil der im Ausland beschäftigten Nationalspieler keinen wie auch immer gearteten Einfluss auf das sportliche Abschneiden bei den Fußball-Welt- und Europameisterschaften hat. Die Wahrscheinlichkeit, bei einer EM oder WM das Halbfinale oder sogar das Finale zu erreichen hängt – dies ist keineswegs überraschend – primär von der Zahl der teilnehmenden Nationen, nicht aber von der geographischen Lage des Arbeitsplatzes der Spieler ab. Auch auf die Platzierung der Auswahlmannschaft in der FIFA-Weltrangliste hat der Anteil der im Ausland beschäftigten Nationalspieler keinen Einfluss, d. h. die Spielstärke der Nationalteams ist vollkommen unabhängig von dem Anteil der Nationalspieler, die ihren Lebensunterhalt außerhalb ihrer Heimat verdienen.

Wenn die an einer EM oder WM teilnehmenden Mannschaften mittlerweile tatsächlich – wie vielfach unterstellt (im Sinne der „es-gibt-keine-Fußballzwerge-mehr-Hypothese“) – vergleichbar spielstark sind, dann müsste die durchschnittliche Tordifferenz über die vergangenen Turniere hinweg systematisch zurückgegangen sein. Auch für diese Vermutung gibt es keinerlei empirische Belege (vgl. Frick 2009).

Insgesamt legen die Befunde damit den Schluss nahe, dass zumindest kurzfristig, d. h. für einen Beobachtungszeitraum von drei Jahrzehnten, eine erhöhte internationale Mobilität

besonders leistungsfähiger Fußball-Profis keineswegs die erwarteten Folgen im Sinne einer zunehmenden „Konkurrenzfähigkeit“ weniger erfolgreicher Nationalmannschaften hat, deren Spieler teilweise oder sogar überwiegend im Ausland spielen. Auch für die von Fußballanhängern immer wieder geäußerte Sorge, die Nationalmannschaften der traditionellen „Fußballländer“ litten unter der Verdrängung des einheimischen Nachwuchses durch „Spielerimporte“ gibt es keinerlei überzeugende Evidenz.

### Der „Schaufenstereffekt“ von Fußball-Weltmeisterschaften

Dass insbesondere Nationalspieler aus Afrika, aber auch solche aus Asien, Nordamerika, Australien und Neuseeland Fußball-Weltmeisterschaften gerne als „Laufsteg“ interpretieren, der ihnen die Möglichkeit gibt, sich für ein Engagement in einer der europäischen Top-Ligen zu empfehlen, ist nicht nur unter Fußballanhängern vollkommen unstrittig. Die Frage, welchen Einfluss Einsätze bei einer Fußball-Weltmeisterschaft aber tatsächlich auf den „Marktwert“ – und damit natürlich auch auf das Gehalt – eines Spielers haben, ist jedoch nach wie vor unbeantwortet.

Unter Verwendung entsprechender Daten aus dem „Kicker-Managerspiel“, die seit der Saison 1995/1996 für die überwiegende Mehrzahl der in einer Saison zum Einsatz kommenden Spieler verfügbar sind und offenbar hervorragende Näherungsgrößen für den Marktwert und seine Veränderung darstellen (vgl. Frick 2007b, 2010), lässt sich dieser Effekt zweifelsfrei quantifizieren. Dies setzt allerdings voraus, dass man zunächst einmal den Einfluss weiterer (potenzieller) Determinanten des individuellen Marktwertes bzw. Gehaltes isoliert: Neben dem Alter, der Zahl der Ligaeinsätze und -tore sowie der Position auf dem Spielfeld haben insbesondere die Zahl der Länderspieleinsätze und die regionale Herkunft eines Spielers einen statistisch signifikanten Einfluss auf sein Gehalt:

- Unter sonst gleichen Bedingungen – d. h. bei statistischer Kontrolle der oben genannten Faktoren – verdient ein Spieler aus Südamerika in der Bundesliga rund 40 Prozent mehr als ein deutscher Athlet. Für Westeuropäer ist die „Lohnprämie“ mit rund 20 Prozent immer noch erheblich, für Osteuropäer, Nordamerikaner, Afrikaner und Asiaten lässt sich kein entsprechender Effekt nachweisen. Dies ist insofern nicht überraschend, als der Anteil an Südamerikanern im Kader mit einer statistisch höheren Ticketnachfrage einhergeht, nicht aber der Anteil an Osteuropäern, Afrikanern und/oder Asiaten. Selbst bei einer eher bescheidenen sportlichen Performance präferieren die Zuschauer also offenbar südamerikanische „Ballzauberer“. Darüber hinaus lässt sich eindeutig nachweisen, dass Spieler aus Südamerika, aber auch aus Westeuropa, signifikant höhere Merchandisingerlöse generieren. So wird beispielsweise die Zahl der Trikotverkäufe ganz erheblich durch den „Klang“ des Namens beeinflusst – „Lucio“ ist offenbar erheblich attraktiver als „Woronin“.

- Länderspieleinsätze haben – wie auch das Alter und die Zahl der Ligaeinsätze – einen positiven, aber nicht-linearen Effekt. Jeder Auftritt für die Nationalmannschaft erhöht das Einkommen mit einer zunächst abnehmenden, später aber wieder zunehmenden Rate, was auf die Existenz spezifischer „Superstareffekte“ hindeutet. Dieser positive Einfluss von Länderspieleinsätzen differiert – und dies ist der entscheidende Punkt – ganz erheblich von deren sportlichem Stellenwert: Jeder Einsatz bei der letzten Fußball-WM erhöht das Einkommen um rund acht Prozent. Einsätze bei weiter zurückliegenden Weltmeisterschaftsturnieren werden zwar ebenfalls noch mit einer Prämie honoriert, doch ist dieser Effekt mit zwei Prozent pro Einsatz erheblich schwächer. Mit anderen Worten: Der Schaufenstereffekt nutzt sich zwar ab, bleibt aber auch langfristig nachweisbar. Interessant ist weiterhin, dass dieser Schaufen-



Quelle: Imago

Abb. 4: Mesut Özil – das im Ruhrgebiet geborene „Jahrhunderttalent“ mit türkischen Vorfahren.

tereffekt keineswegs für alle Spieler gleich ist. Diejenigen, die bereits vor dem jeweiligen WM-Turnier als „Stars“ gelten, profitieren davon deutlich weniger als diejenigen, die zuvor weniger im Blickpunkt der Fußballöffentlichkeit standen (vgl. Deutscher und Simmons 2010). Um es anders zu formulieren: Ein „durchschnittlicher“ Nationalspieler, der es bei der WM auf fünf Einsätze bringt (weil er beispielsweise mit seiner Mannschaft im Viertelfinale ausscheidet) wird seinen Marktwert um rund 40 Prozent erhöhen. Bei einem Spieler, dessen Team mindestens das Spiel um den dritten Platz erreicht, beträgt die entsprechende Steigerung des Marktwertes nahezu 60 Prozent.

Was folgt aus den Ergebnissen? Die Erkenntnis, dass es sich offenbar lohnt, bei einem sportlichen „Mega-Event“ wie der Fußball-WM dabei zu sein, mag zunächst trivial klingen. Der jüngst erbrachte Nachweis, dass dies in vielen Fällen auch zu systematischen Verhaltensänderungen führt, ist aber vielleicht doch überraschend: Spieler, deren Nominierung für das Turnier zwar wahrscheinlich, aber noch keineswegs gesichert ist, steigern ihre Performance im Vorfeld der Kaderzusammenstellung ganz erheblich – eine Entwicklung, die weder bei denjenigen zu beobachten ist, die als „gesetzte“ gelten, noch bei denjenigen, die keinerlei Chance (mehr) haben, den „WM-Zug“ noch zu erreichen (vgl. Miklos-Thal und Ulrich 2009).

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Bosman-Urteil des Europäischen Gerichtshofes hat die seit den sechziger Jahren zu beobachtende Migration von Fußball-Profis insbesondere aus Osteuropa, Südamerika, Asien und Afrika nochmals erheblich verstärkt. Mittlerweile spielt nahezu die komplette Nationalmannschaft von Ländern wie Argentinien und Brasilien, Kamerun und Senegal – um nur einige der erfolgreichereren zu nennen – in den Top-Ligen in Westeuropa. Die damit einhergehende Zunahme der „Spiel(er)qualität“ ist ohne Zweifel eine der zentralen Ursachen für das nach wie vor wachsende Zuschauerinteresse nicht nur in der deutschen Fußball-Bundesliga, sondern auch in der englischen „Premier League“ und der spanischen „Primera Division“.

Dass die vielfach herausragende individuelle Leistungsfähigkeit insbesondere afrikanischer Fußballer – an der sich die Zuschauer in den Stadien nicht nur West-, sondern mittlerweile auch Osteuropas erfreuen (können)<sup>8</sup> – bislang nicht ausgereicht hat, einer der Nationalmannschaften zu einer vorderen Platzierung bei einer Weltmeisterschaft zu verhelfen, hat vermutlich Gründe, die abseits des Platzes liegen: Günstlingswirtschaft, Nepotismus, Korruption und Stammesintrigen sind – wie man im Verlauf eines jeden großen Turniers immer wieder beobachten kann – keineswegs singuläre Phänomene. Solange die „Selbstreinigungskräfte“ der nationalen Fußballverbände nicht ausreichen, diese eher „sportfremden“ Probleme zu lösen und sich die FIFA als der zuständige internationale Dachverband kaum um deren wirksame Bekämpfung kümmert, werden die Fußball-Fans in

Europa auch weiterhin begeistert die Darbietungen afrikanischer Spieler in ihren Vereinen verfolgen können, ohne Sorge haben zu müssen, dass die Konkurrenzfähigkeit der eigenen Nationalmannschaft darunter leidet.

Abgesehen von den Zuschauern in Deutschland, England, Frankreich, Italien und Spanien profitieren auch die mobilen unter den Spielern: Wer im Anschluss an ein großes Turnier in eine der westeuropäischen Top-Ligen wechselt, kann seinen Marktwert ganz erheblich steigern. Vor diesem Hintergrund kann es kaum überraschen, wenn sich die von (mehr oder weniger renommierten) ehemaligen Spielern gegründeten Fußballschulen insbesondere in Afrika eines regen Zulaufs erfreuen: Die Chance – und sei sie noch so klein – dem alltäglichen Mix aus Armut, Gewalt und Korruption zu entkommen, motiviert nicht nur dazu, besondere Anstrengungen zu unternehmen, sondern macht leider auch anfällig für die „Heilsversprechen“ der weniger seriösen unter den Scouts, Beratern, Managern und Trainern, die mehr um die Maximierung des eigenen Wohlergehens als das ihrer Schützlinge bemüht sein dürften.

### Literatur

ANTONIONI, PETER UND JOHN CUBBIN (2000): THE BOSMAN RULING AND THE EMERGENCE OF A SINGLE MARKET IN SOCCER TALENT. EUROPEAN JOURNAL OF LAW AND ECONOMICS, 9, PP. 157–173.

DEUTSCHER, CHRISTIAN UND ROBERT SIMMONS (2010): THE ECONOMICS OF THE WORLD CUP, MIMEO, DEPARTMENT OF MANAGEMENT, UNIVERSITY OF PADERBORN.

FEESS, EBERHARD, BERND FRICK UND GERD MÜHLHEUSER (2004): LEGAL RESTRICTIONS ON OUTSIDE TRADE CLAUSES – THEORY AND EVIDENCE FROM GERMAN SOCCER, DISCUSSION PAPER 1180, BONN: INSTITUTE FOR THE STUDY OF LABOR.

FRICK, BERND (2007A): THE FOOTBALL PLAYERS' LABOUR MARKET: EMPIRICAL EVIDENCE FROM THE MAJOR EUROPEAN LEAGUES. SCOTTISH JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY, 54, PP. 422–446.

FRICK, BERND (2007B): SALARY DETERMINATION AND THE PAY-PERFORMANCE RELATIONSHIP IN PROFESSIONAL SOCCER: EVIDENCE FROM GERMANY, IN: RODRIGUEZ, PLÁCIDO, STEFAN KÉSENNE AND JAUME GARCIA (EDS.): SPORTS ECONOMICS AFTER FIFTY YEARS: ESSAYS IN HONOR OF SIMON ROTTENBERG, OVIEDO: UNIVERSITY OF OVIEDO PRESS, PP. 125–146.

FRICK, BERND (2009): GLOBALIZATION AND FACTOR MOBILITY: THE IMPACT OF THE „BOSMAN-RULING“ ON PLAYER MIGRATION IN PROFESSIONAL SOCCER. JOURNAL OF SPORTS ECONOMICS, 10, PP. 88–106.

FRICK, BERND (2010): THE FOOTBALL PLAYERS' LABOR MARKET: RECENT DEVELOPMENTS AND ECONOMETRIC EVIDENCE, MIMEO, DEPARTMENT OF MANAGEMENT, UNIVERSITY OF PADERBORN.

MIKLOS-THAL, JEANINE UND ULRICH, HANNES (2009): NOMINATION CONTESTS: THEORY AND EMPIRICAL EVIDENCE FROM PROFESSIONAL SOCCER, DISCUSSION PAPER 09-027, ZENTRUM FÜR EUROPÄISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG, MANNHEIM.

- 1 Vgl. mit Blick auf die zunächst sinkende, seit einigen Jahren aber deutlich zunehmende „Ausbildungsbereitschaft“ der Vereine Antonioni und Cubbin (2000).
- 2 Vgl. dazu u. a. Feess, Frick und Mülheusser (2004) sowie zusammenfassend Frick (2007a): Entgegen der in der (Sport-)Öffentlichkeit vielfach kolportierten Einschätzung, die Gehälter wie auch die Ablösezahlungen seien aufgrund des Bosman-Urteils „explodiert“, kommen alle verfügbaren Studien zu dem Ergebnis, dass diese Entwicklung ausschließlich mit den rapide steigenden Einnahmen der Vereine zu erklären ist (darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass nur noch bei rund 30 Prozent der Wechsel überhaupt eine Ablösesumme gezahlt wird). Die zu beobachtende Zunahme der durchschnittlichen Vertragslaufzeit (von knapp zweieinhalb Jahren auf mehr als drei Jahre) ist jedoch in der Tat dem Urteil geschuldet.
- 3 Vgl. dazu die Sonderhefte des Sportmagazins „Kicker“, die seit der Saison 1995/1996 die entsprechenden Informationen bereitstellen.
- 4 Zusätzlich durften im Spielbericht maximal zwei „assimilierte“ Spieler aufgeführt werden, die fünf Jahre ununterbrochen im Land des betreffenden nationalen Verbandes gespielt hatten, davon drei Jahre in Juniorenmannschaften.
- 5 Die Ausländeranteile in den übrigen westeuropäischen Spitzenligen (Italien, Spanien, England und Frankreich) sind teilweise sogar noch deutlich höher. Bemerkenswert ist insbesondere die Tatsache, dass der Anteil ausländischer Spieler in der französischen Liga bereits in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts über 30 Prozent betrug und dass in den Jahren 1929 bis 1965 mehr als 350 Ausländer (darunter 50 Prozent aus Argentinien, Brasilien und Uruguay) in der ersten italienischen Liga spielten. Dies bedeutet, dass die für die Bundesliga erst in den späten achtziger Jahren zu verzeichnenden Größenordnungen in

den übrigen westeuropäischen Ligen zu einer Zeit erreicht wurden, als die oberste deutsche Spielklasse noch gar nicht existierte.

- 6 Dass die Vereine bis zur oben genannten Entscheidung des EuGH in Pflichtspielen maximal drei Ausländer (häufig abschätzig als „Legionäre“ bezeichnet) einsetzen durften, stellte zugleich sicher, dass primär Spieler aus ihrem jeweiligen Land auflaufen konnten bzw. mussten, was im Allgemeinen damit gerechtfertigt wurde, dass nur so dem Identifikationsbedürfnis der Zuschauer Rechnung getragen werden könne. Ob das Zuschauerinteresse bei einem (zu) hohen Anteil ausländischer Spieler tatsächlich sinkt, ist indes mehr als fraglich: Zum einen erweisen sich bei statistischer Kontrolle der sportlichen Leistung insbesondere Trikots mit den Namen westeuropäischer und südamerikanischer Spieler als wahre „Kassenschlager“ und zum anderen geht ein höherer Anteil an Westeuropäern und/oder Südamerikanern in den jeweiligen Kadern unter sonst gleichen Bedingungen – d. h. bei gleicher sportlicher Performance – mit einem signifikant höheren Zuschaueraufkommen einher.
- 7 Die sinkenden Zuschauerzahlen in Italien bzw. das notorisch geringe Interesse am Stadionbesuch in Frankreich haben vermutlich andere Gründe: In Italien ist die Aggressivität und Gewaltbereitschaft sogenannter „Fans“ für viele Menschen Grund, die veralteten und unkomfortablen Stadien zu meiden. In Frankreich ist das gemeinsame Verfolgen der Live-Übertragungen aller Spiele der ersten Liga im Pay-TV für viele Fußballanhänger offenbar attraktiver als der Stadionbesuch.
- 8 So hat beispielsweise in der russischen Liga – und hier insbesondere bei den Spitzenklubs – die Zahl südamerikanischer und afrikanischer Spieler in den letzten Jahren ganz erheblich zugenommen.

#### Kontakt

Bernd Frick

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Department für Management

05251 60-2097

bernd.frick@notes.upb.de

# Ein energieeffizientes Internet der Zukunft

## Neue Architekturen und Optimierungen senken Kosten

Prof. Dr. rer. nat. Holger Karl, Dipl.-Inf. Christian Dannewitz, Matthias Herlich, M. Sc.

**Der Stromverbrauch von Informationstechnologie (IT) ist für einen steigenden Anteil der Gesamtkosten verantwortlich. Da in der Zukunft nicht nur die Geschwindigkeit und der Durchsatz von IT-Geräten erhöht werden muss, sondern gleichzeitig auch ihre Kosten gesenkt werden müssen, bietet sich hierzu eine Verbesserung der Energieeffizienz im laufenden Betrieb an.**

Neue und leistungsfähigere Geräte verbrauchen meistens mehr Strom als ihre Vorgänger, so auch bei der Infrastruktur des Internets. Im Zuge der Entwicklung eines Internets der Zukunft wirken wir dieser ständigen Erhöhung des Stromverbrauches des Internets entgegen.

Um den Energieverbrauch des Internets zu reduzieren, muss jedes Gerät, das mit dem Internet verbunden ist (PC, Laptop, Router, Mobiltelefon, Basisstation, ...) energieeffizienter werden. Das Internet der Zukunft muss allerdings noch einen Schritt weitergehen und den Stromverbrauch des Gesamtsystems verringern. Der Gesamtverbrauch lässt sich dadurch weiter reduzieren, dass sich die einzelnen Geräte aufeinander abstimmen. So muss z. B. ein Benutzer nur mit der aktuell benötigten Übertragungsrate versorgt werden und nicht mit der maximal möglichen.

Allerdings sollte ein Benutzer durch etwaige Maßnahmen zur Energieeinsparung nicht beeinträchtigt werden. Damit der Benutzer bei der Abschaltung eines Gerätes keine verminderte Dienstqualität bemerkt, dürfen nur Geräte abgeschaltet werden, die aktuell nicht benötigt werden oder deren Aufgaben von anderen Geräten übernommen werden können. Dies ist möglich, da die Auslastung von IT-Systemen im Tagesverlauf meistens stark schwankt.

In einem späteren Schritt lässt sich diese energieeffiziente Infrastruktur dann nutzen, um Komponenten zu steuern, die klassischerweise nicht mit IT-Hardware verbunden sind. Dies ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die IT-Infrastruktur dazu weniger Energie verbraucht als durch ihre Verwendung eingespart wird. Ein Beispiel hierfür ist das sogenannte SmartGrid (intelligentes Stromnetz), in dem Stromerzeugung, -speicherung und -verbrauch besser aufeinander abgestimmt werden können als im aktuell verwendeten Stromnetz. Ein weiteres Beispiel ist intelligentes Wohnen, das im Haushalt vorhandene Geräte vernetzt, um diese intelligent ein- und auszuschalten.

Um ein solches energieeffizientes Netz zu erreichen wird weltweit und im Fachgebiet „Rechnernetze“ der Universität Paderborn an zahlreichen Projekten geforscht. Diese Forschungen führen wir unter anderem in dem vom Bundes-



**Prof. Dr. rer. nat. Holger Karl** ist seit Oktober 2004 Leiter des Fachgebiets „Rechnernetze“ des Instituts Informatik der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik.

ministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojekt „Communicate Green“ und in dem EU-Projekt SAIL durch. Wir berichten hier über ausgewählte Möglichkeiten Energie einzusparen:

- Das Abschalten von Routern der Internetinfrastruktur.
- Das Abschalten von Basisstationen in Mobilfunknetzen.
- Energiesparmöglichkeiten durch die Einführung eines „Network of Information“.

### Router abschalten

Das Projekt NOBEL [5] (Next generation Optical network for Broadband European Leadership) hat eine Abstraktion der Internet-Infrastruktur von Deutschland erstellt. Diese Infrastruktur verbindet Knotenpunkte in ganz Deutschland untereinander und bindet diese an das Ausland und Internet-Knoten (z. B. German Commercial Internet Exchange, kurz DE-CIX) an.

Die in Abbildung 1 vereinfacht dargestellte Infrastruktur besteht aus den so genannten Routern (die Kreise mit den Städtenamen), welche dafür sorgen, dass die Daten durch das Netz weitergeleitet werden, bis sie ihr Ziel erreicht haben. Um die Daten zu übertragen, sind die Router mit Glasfaserkabeln (den Linien zwischen den Punkten) verbunden. Ein Beispiel für einen Router ist das in Abbildung 2 dargestellte Cisco Routing System 1 (CRS-1). Ein solches Routersystem hat je nach Konfiguration eine Leistungsaufnahme zwischen fünf Kilowatt und ein Megawatt.

In vielen Netzen (sowohl Internet als auch Mobilfunk) schwankt die Auslastung (z. B. bedingt durch den Tag/Nacht-Zyklus). Telekommunikationsnetze sind im Normalfall so aufgebaut, dass sie mehr als die maximale Last bewälti-

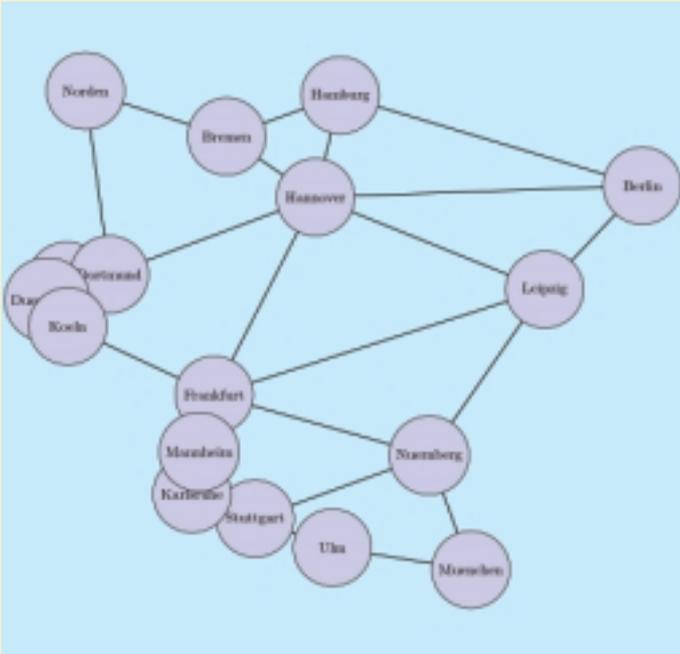


Abb. 1: Beispielhafte vereinfachte Netztopologie.

gen können. Da die erwartete Last nur geschätzt werden kann und die Vergangenheit gezeigt hat, dass die Nutzung von IT-Infrastrukturen immer weiter zunimmt, sind diese Netze meist leistungsfähiger dimensioniert als aktuell nötig. Ein weiterer Grund für die Überdimensionierung solcher Infrastrukturen ist die Ausfallsicherheit: Teile des Netzes werden mehrfach installiert, aber im Normalfall gar nicht benötigt. Diese Komponenten stehen unbenutzt bereit und werden nur in einem Fehlerfall (z. B. Ausfall einer anderen Komponente) verwendet.

All diese Punkte zeigen, dass in IT-Infrastrukturen viel mehr Komponenten aktiv sind als für dessen Betrieb zwingend notwendig sind. Wir versuchen, möglichst viele dieser zu einem gegebenen Zeitpunkt überflüssigen Komponenten abzuschalten, um Energie zu sparen. Dies soll aber nur dort erfolgen, wo es für die Benutzer zu keinen Einschränkungen führt. Des Weiteren müssen die deaktivierten Komponenten wieder aktiviert werden, sobald sie benötigt werden (Ausfall anderer Komponenten oder Anstieg der Last). Die Frage ist, welche Komponenten wann eingeschaltet und ausgeschaltet werden sollen.

**Die Lösung dieses Problems ist aufgrund mehrerer Überlegungen schwierig:**

- Das Wissen über die Anforderungen an das Netz sind im Netz verteilt und liegen nicht zentral vor. Es ist unklar, ob es besser ist, dieses Wissen zu sammeln und zentral eine Lösung zu berechnen oder mit den vorhandenen Informationen lokal eine Entscheidung zu treffen.
- Selbst bei zentral gesammeltem Wissen über alle Anforderungen ist das Berechnen der Lösung mit minimalem Energieverbrauch sehr aufwändig.
- Das Finden der Lösung muss schnell geschehen, da sich die Last im Laufe der Zeit ändert. Eine perfekte Lösung für eine Lastsituation, die gar nicht mehr existiert, kann nicht mehr zum Energiesparen verwendet werden.



Abb. 2: Industrieller Router: Cisco Carrier Routing System 1 (CRS-1).

Um in einem Netz Energie zu sparen, ist es zunächst nötig zu wissen, wann welche Geräte wie viel Energie verbrauchen. Markant ist hierbei, dass Router fast unabhängig von ihrer Auslastung Strom verbrauchen, d. h. ein voll ausgelasteter Router verbraucht nur wenig mehr Strom als ein im Leerlauf laufender Router [4]. Dasselbe gilt für eingeschaltete, aber wenig genutzte Netzverbindungen. Ziel eines energieeffizienten Netzes ist es, eine Teilmenge von Routern und Verbindungen auszuwählen, welche die Anforderungen aller Benutzer erfüllen und zugleich möglichst wenig Strom verwenden. Da sich aber die angeforderten Datenraten der einzelnen Nutzer ändern, wird sich diese Teilmenge auch im Laufe der Zeit ändern; sie muss also dynamisch neu bestimmt werden.

Die Abbildung 3 zeigt, wie viel Strom ein Netz ohne Abschaltung verbraucht (lila Linie) und wie viel nötig wäre, wenn nicht benötigte Verbindungen abgeschaltet werden (orange Linie). Für beide Szenarien ist der Energieverbrauch abhängig von der Last im Netz dargestellt. Das Ausrechnen der perfekten Lösung, die nur minimale Energie benötigt, ist so komplex, dass dies nicht in der gegebenen Zeit möglich ist und somit nur angenähert werden kann. Die große Spanne zwischen aktuellem Verbrauch und theoretischem Optimum stimmt allerdings zuversichtlich, hier selbst mit nur näherungsweise arbeitenden Algorithmen Energie sparen zu können.

**Basisstationen abschalten**

Ähnlich wie das Abschalten von nicht benötigten Routern im Internet lassen sich Basisstationen von Mobilfunknetzen abschalten, wenn andere Basisstationen deren Aufgaben übernehmen können. Hierbei muss nicht nur beachtet werden, dass alle Endgeräte die benötigte Datenrate zur Verfügung gestellt bekommen, sondern auch, dass das Mobilfunknetz von jedem Ort aus erreicht werden kann –

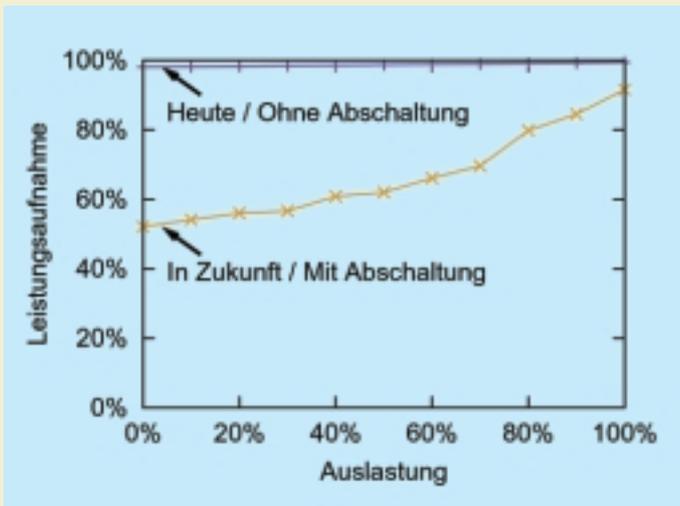


Abb. 3: Ein momentan verwendetes Netz im Vergleich mit einem energieoptimierten Netz.

unabhängig davon, ob dort aktive Nutzer sind oder nicht. Eine typische Basisstation verbraucht zwischen 750 Watt und drei Kilowatt. In Deutschland existieren zurzeit mehr als 100 000 solcher Basisstationen.

Da sich die im Mobilfunk verwendete Technologie in den letzten Jahren stark weiterentwickelt hat, gibt es bereits jetzt, vor allem in Ballungszentren, eine redundante Abdeckung. So gibt es zusätzlich zu dem Netz der zweiten Generation (GSM) auch das Netz der dritten Generation (UMTS) und in absehbarer Zeit wird die vierte Generation in Betrieb genommen werden. Neue Mobiltelefone haben außerdem die Möglichkeit, sich mit einem Wireless Local Area Network (WLAN) zu verbinden und darüber Telefongespräche und Daten zu übertragen. Diese verschiedenen Technologien sorgen nun dafür, dass an vielen Orten die Abdeckung größer ist als benötigt. Eine beispielhafte Überlagerung solcher Mobilfunkzellen verschiedener Größen sind in Abbildung 4 dargestellt. In der Realität sind die Überlagerungen aufgrund der Ausbreitungscharakteristik und der Platzierungen der Basisstationen allerdings nicht so regelmäßig wie hier dargestellt.

**Des Weiteren ändert sich an vielen Orten das Nutzungsverhalten abhängig von der Zeit:**

- In einem Industriegebiet ist die Auslastung nachts fast Null.
- Bei Massenveranstaltungen (z. B. Fußballspiel) ist die Auslastung kurzzeitig sehr hoch.
- Bei einer Festveranstaltung wird auch nachts (oder gerade nachts) die Auslastung außerordentlich hoch sein.

Die Auslastung wird sich oft im Tages- oder Wochenrhythmus ändern; sie wird aber nicht an allen Orten zur gleichen Zeit ihr Maximum/Minimum erreichen. Es ist also nicht einfach möglich, nachts auf eine Minimalabdeckung umzuschalten. Eine Planung muss, um Energie zu sparen, abhängig von Ort und Zeit Basisstationen ein- und ausschalten. Bei niedriger Last kann eine Basisstation ihren Abdeckungsbereich vergrößern und somit anderen Basisstationen ermöglichen, sich abzuschalten. Diese dynamische Verände-

rung der Größe einer Funkzelle wird Zellatmung (cell breathing) genannt. Diese Veränderung kann dazu genutzt werden, bei niedriger Last ein größeres Gebiet abzudecken.

Zusätzlich möchten Mobilfunkbetreiber nun aber auch bei unregelmäßigen Veränderungen (Flashmobs, Katastrophenfällen, Demonstrationen, ...) ihren Kunden einen möglichst stabilen Dienst anbieten. Da eine menschliche Intervention in solchen Situationen unerwünscht ist, sollte sich ein intelligentes Mobilfunknetz an die Anforderungen anpassen. Um energieeffizient zu sein und trotzdem alle Benutzer zufriedenzustellen, muss das Netz hierzu nicht nur automatisch, sondern auch schnell reagieren. Dies steht allerdings im Gegensatz zu dem Aufwand, der nötig ist, um eine optimale Anpassung zu berechnen.

Um abzuschätzen, wie viel Energie durch die intelligente Abschaltung von Basisstationen möglich ist, haben wir ein Szenario, in dem sich GSM- und UMTS-Zellen überlagern, modelliert. Anschließend haben wir für unterschiedliche Aktivitätswahrscheinlichkeiten der Mobiltelefone berechnet, wie viel Energie mindestens benötigt wird, um alle Anforderungen zu erfüllen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei ist die Aktivitätswahrscheinlichkeit die Wahrscheinlichkeit, dass in einem gegebenen Gebiet ein Mobiltelefon die ihm zugesprochene Datenrate wirklich benötigt. Der Energieverbrauch ist als Anteil des maximalen Verbrauches ohne Abschaltung dargestellt.

An diesem Beispiel lässt sich erkennen, dass sehr viel Energie gespart werden kann, wenn die Last des Netzes sehr gering ist. Bei einem stark ausgelasteten Netz lässt sich wenig, aber immerhin etwas Energie sparen. Zur energieeffi-

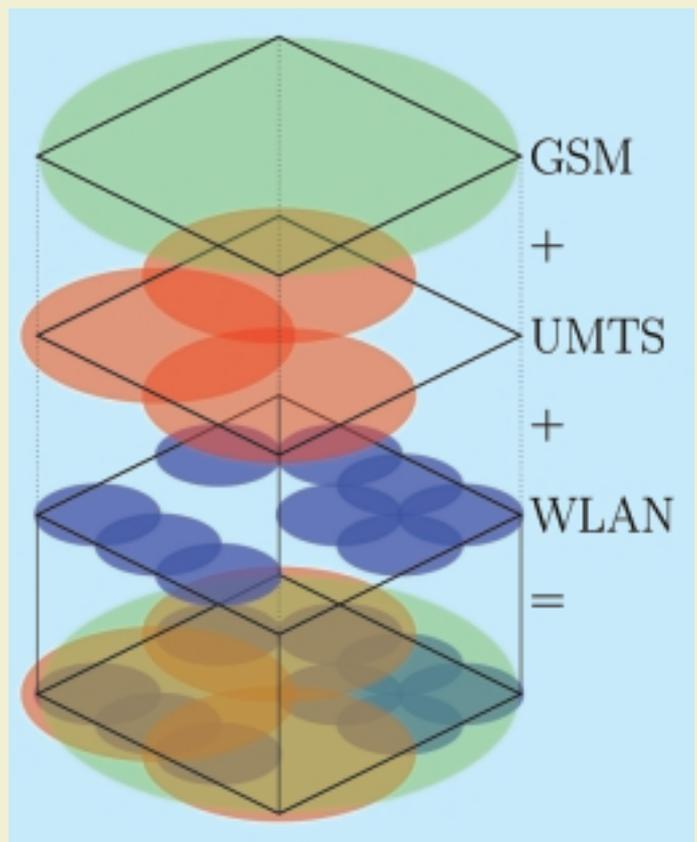


Abb. 4: Schematische Überlagerung mehrerer Mobilfunkzellen unterschiedlicher Technologien.

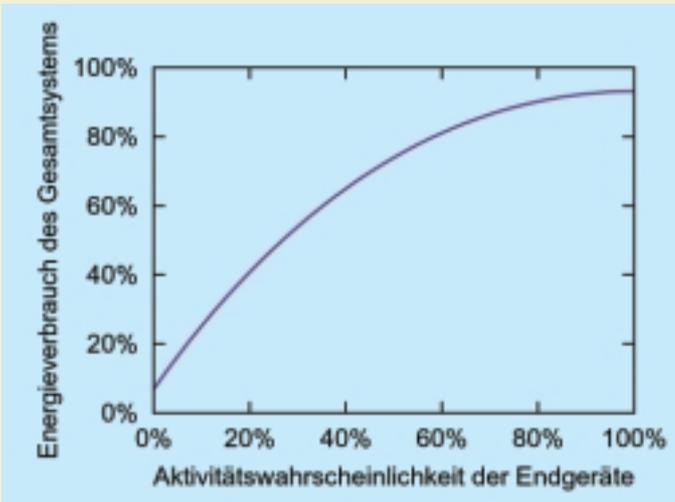


Abb. 5: Energieverbrauch bei gegebener Aktivitätswahrscheinlichkeit eines einzelnen Mobiltelefons.

zienten Nutzung von Mobilfunknetzen ist es also notwendig, Basisstationen, zumindest an Zeitpunkten mit niedriger Last, abzuschalten.

### Network of Information und Caching

Die bisher erläuterten Punkte erlauben, in einem Netz bei gegebenen Anforderungen die benötigte Energie zu verringern. Zusätzlich hierzu lassen sich aber auch die Anforderungen an ein Netz bezüglich der zu übertragenden Datenmenge reduzieren, indem die Datenverteilung im Netz effizienter gestaltet wird. Dies ist das Ziel der informationszentrischen Ansätze, die zurzeit eine wesentliche Rolle in der Weiterentwicklung der Internet-Architektur spielen. Ein Entwurf einer informationszentrischen Architektur ist das Network of Information (NetInf) [1], das wir im Rahmen der EU-Projekte 4WARD [2] und SAIL [3] entwickeln.

Die heutige Internet-Architektur basiert auf der Kernidee, Netzknoten (also Computer) miteinander zu verbinden. Daher spricht man hier auch von einer knotenzentrischen Architektur. Bei der Entwicklung der heutigen Internet-Architektur war das wesentliche Nutzungsszenario, dass sich der Nutzer von seinem Computer mit einem ganz bestimmten anderen Computer verbinden wollte, um eine an diesem Computer angeschlossene Ressource, also z. B. eine Festplatte oder einen Drucker, zu nutzen. In den letzten Jahren hat sich die Nutzung des Internets jedoch maßgeblich geändert. Heute ist das dominierende Szenario, Informationen zu beziehen und zu verteilen: Der Nutzer sieht das Internet im Regelfall als ein homogenes System, an das er Anfragen für Daten, wie z. B. eine Videodatei, stellt und diese dann als Antwort erhält (Abbildung 6). Dabei ist die genaue Quelle der Daten nicht interessant. Diese Sichtweise passt jedoch nicht mit der heutigen Internet-Architektur zusammen, in der der Nutzer für jede Anfrage den Ort (mittels Unified Resource Locator (URL), also z. B. <http://www.uni-paderborn.de>) angibt, von dem er die Daten erhalten möchte. Es gibt zwar bereits Lösungen um dies zu ändern, diese sind aber nachträglich ergänzt und nicht in das Netz integriert. Hier

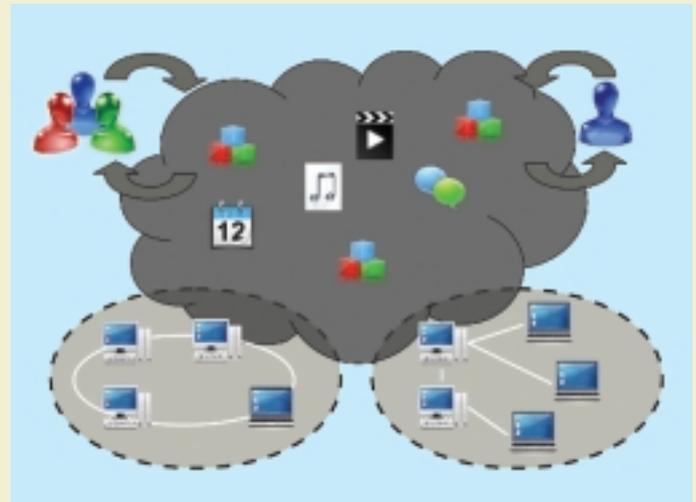


Abb. 6: Die Idee des Network of Information. Der Nutzer fragt direkt nach Informationen und das informationszentrische Netz wählt die „beste“ Kopie aus.

fällt auf, dass Daten an sich heutzutage im Internet gar keinen eindeutigen Namen haben, sondern nur durch ihren Speicherort, also die URL, angesprochen werden.

Diese Diskrepanz zwischen dem dominierenden Nutzungsszenario und der zugrunde liegenden Netz-Architektur führt im heutigen Internet zu mehreren Problemen: Erstens werden hierdurch Daten unnötigerweise mehrfach übertragen, da das Netz nicht selbst entscheiden kann, von wo es die Daten liefert. Wenn z. B. bereits eine Kopie der Daten im lokalen Netz vorhanden ist, werden in der heutigen Internet-Architektur dennoch die Daten bei einer weiteren Anfrage erneut von einer gegebenenfalls weit entfernten Datenquelle übertragen. Es existieren zwar sogenannten Proxyserver, die diese Funktion teilweise erfüllen, aber bei diesen ist es meist nötig, sie von Hand zu konfigurieren. Zweitens erzeugen die vielen Anfragen bei populären Daten am Server, also am Computer, der die Daten liefert, eine hohe Last. Insbesondere müssen Server heutzutage so ausgelegt sein, dass sie auch hohe temporäre Lastspitzen ohne Probleme handhaben können. Daher müssen Server überdimensioniert werden und verbrauchen damit unnötig viel Energie.

Der informationszentrische Architekturansatz hat das Ziel, diese Probleme zu lösen, indem er grundsätzlich besser an das dominierende Nutzungsszenario der Informationsanforderung und Informationsverteilung angepasst ist als der knotenzentrische Ansatz. Der informationszentrische Ansatz stellt die Information an sich – im Vergleich zu der Verbindung mehrerer Netzknoten im knotenzentrischen Ansatz – in den Mittelpunkt der architektonischen Überlegungen und konstruiert um die Information herum die Netz-Architektur. Es ist das Ziel, unnötigen Datenverkehr zu vermeiden, indem immer auf eine möglichst nahe Datenkopie zugegriffen wird. Dies wird erreicht, indem das Netz selbst entscheidet, von wo es die Daten bekommt. Hierdurch kann direkt der Energieverbrauch gesenkt werden, weil u. a. redundante Netz-Kapazitäten abgeschaltet werden können. Zusätzlich soll die Anfragelast auf alle existierenden Server/Datenkopien verteilt werden. Werden Daten besonders populär, entstehen automatisch im Netz mehr verteilte Kopien dieser Daten,



Abb. 7: Ein Beispiel für eine Augmented Internet Anwendung. Die reale Welt wird auf dem Handybildschirm mit Informationen angereichert.

auf die sich die zusätzlichen Anfragen dann verteilen. Dies führt zu Energieeinsparungen bei den Servern, weil jeder einzelne Server nicht mehr überdimensioniert werden muss, zusätzliche Server unnötig werden, und somit im gesamten Netz die Server-Überkapazitäten reduziert werden können.

**Dieser Ansatz führt zu mehreren zentralen Änderungen der Internet-Architektur:**

1. Jedes Datum (z. B. eine Datei, eine Webseite, etc.) erhält einen global eindeutigen, persistenten Identifikator (ID), der insbesondere unabhängig vom Speicherort der Information ist.
2. Es werden Zwischenspeicher (Caches) im Netz eingerichtet, die häufig angefragte Information zwischenspeichern. Diese können deutlich effizienter eingesetzt werden als heutige Caches, weil sie direkt gleiche Daten an überein-

stimmenden Identifiern erkennen können, auch wenn die Daten von unterschiedlichen Rechnern (also mit unterschiedlichen URLs) empfangen wurden.

3. Anfragen nach Information werden in der Form Get(ID), also ortsunabhängig, gestellt. Daher kann das Netz selbst entscheiden, wie und woher es die angefragte Information beschafft, z. B. aus einem Cache, von einem beliebigen Computer, der die gleiche Information anbietet, oder von der Originalquelle.
4. Sicherheit ist zentraler Bestandteil der Netz-Architektur: Insbesondere kann anhand der angefragten ID direkt festgestellt werden, ob die empfangenen Daten korrekt und nicht modifiziert sind (Self-certification) und wer der Autor der Daten ist (owner authentication), soweit durch den Autor gewünscht. Gleichzeitig wird eine anonyme Veröffentlichung von Daten unterstützt.

Neben der Energieeffizienz bietet das Network of Information noch viele weitere Vorteile: So wird die Verfügbarkeit von Informationen deutlich erhöht, das Management von Daten wird erleichtert, weil die Dateien nicht mehr ortsgebunden sind und daher frei verschoben werden können, und die Entwicklung und der Betrieb von Applikationen wird oft erleichtert, z. B. im Bereich der mobilen, kontextabhängigen, also z. B. ortsbezogenen, Applikationen (Abbildung 7).

Wir haben einen Prototypen der informationszentrischen Netz-Architektur entwickelt und diesen als Open Source Projekt OpenNetInf [6] veröffentlicht. Im gleichen Rahmen wurde die Kern-Infrastruktur eines informationszentrischen Netzes in Betrieb genommen (Abbildung 8) und ist nun weltweit verfügbar, so dass darauf aufbauend die informationszentrische Infrastruktur ausgebaut werden kann und bereits heute Applikationen für das Network of Information entwickelt werden können, um direkt Energieeinsparungen zu ermöglichen.

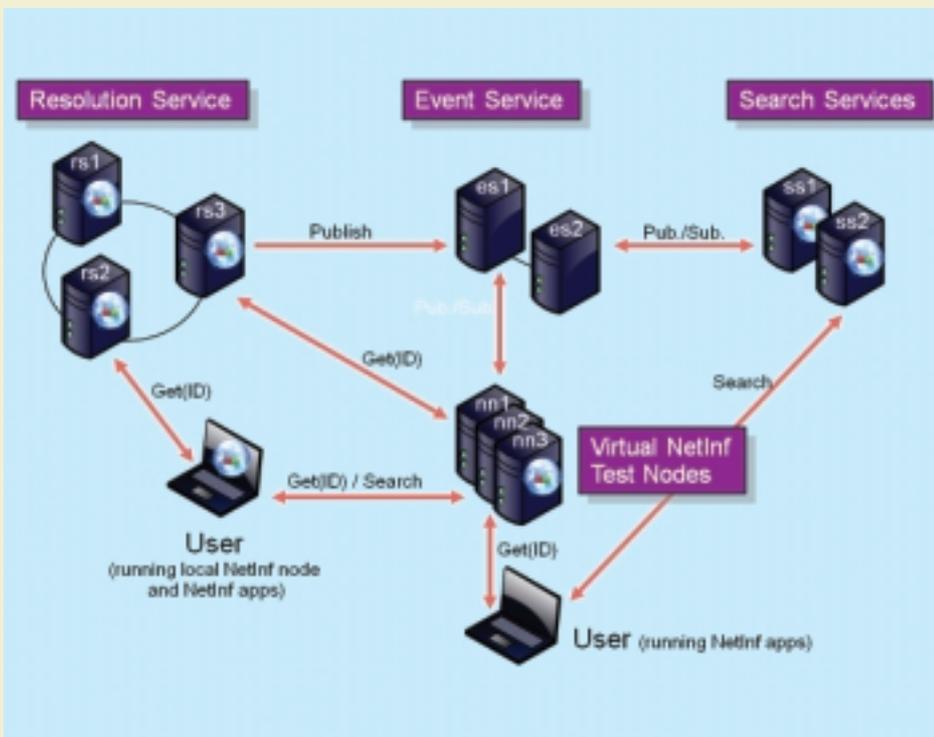


Abb. 8: Die Architektur von OpenNetInf.

In Abbildung 9 haben wir in einem vereinfachten Szenario den Energieverbrauch der heutigen Internet-Architektur (100 Prozent) mit unseren Ansätzen verglichen. Die Aktivitätswahrscheinlichkeit ist hierbei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Endgerät (Computer, Mobiltelefon, ...) Daten übertragen will. Hierzu sind die mittleren Kosten dargestellt, welche dadurch in der Infrastruktur verursacht werden. Die erste Kurve (lila Linie) zeigt den Energieverbrauch, wenn Hardware, die nicht benötigt wird, abgeschaltet wird. Die zweite Kurve (orange Linie) zeigt den Energieverbrauch, wenn nicht benötigte Hardware abgeschaltet wird und zusätzlich nähere Kopien der Daten verwendet werden, wie es durch ein Network of Information möglich ist. Hieran lässt sich erkennen, dass es ein großes Einsparpotenzial gibt und dieses

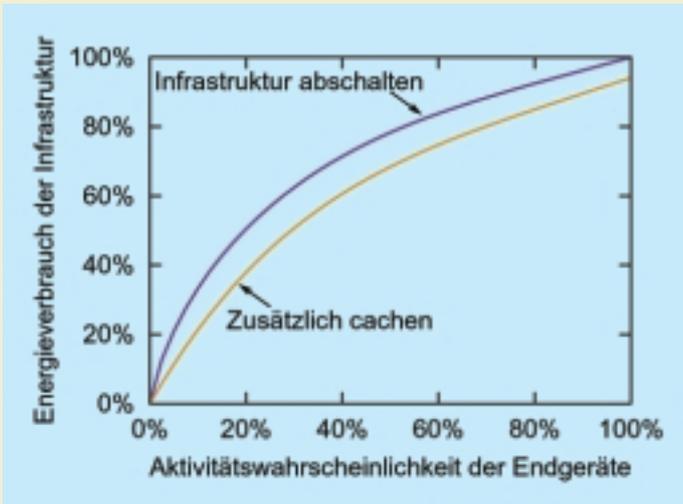


Abb. 9: Energieeinsparungen mit einem Network of Information.

durch die Nutzung eines Network of Information noch vergrößert wird. In dieser Analyse haben wir nur den Energieverbrauch von Terminals (Endgeräten) und der Infrastruktur analysiert; die Möglichkeiten, die ein Network of Information zum Energiesparen in Server- und Datenzentren bietet, wurden hier nicht eingerechnet.

### Zusammenfassung

Es wird in Zukunft nicht nur jedes einzelne Gerät energieeffizienter arbeiten, sondern alle Geräte, die in einem Netz zusammengefasst sind, werden durch koordiniertes Anpassen an die jeweilige Last weiter Energie einsparen. In einem weiteren Schritt werden dann die Techniken des Network of Information helfen, die Last zu senken und dadurch nochmals Energie zu sparen.

Die unterschiedlichen, hier skizzierten Ansätze und Techniken kommen dabei nicht von ungefähr. Es gibt für ein energieeffizientes Internet der Zukunft nicht eine Technik, die eingesetzt werden kann, um große Mengen Energie zu sparen. Vielmehr muss eine Vielzahl verschiedener Methoden verwendet werden, um ein energieeffizientes Netz der Zukunft zu erhalten.

### Literatur

- [1] C. DANNEWITZ, „NETINF: AN INFORMATION-CENTRIC DESIGN FOR THE FUTURE INTERNET“, IN PROC. 3RD GI/ITG KUVS WORKSHOP ON THE FUTURE INTERNET, MAY 2009.
- [2] 4WARD 7TH FRAMEWORK EU-Projekt: [HTTP://WWW.4WARD-PROJECT.EU](http://www.4ward-project.eu).

- [3] SAIL 7TH FRAMEWORK EU-Projekt: [HTTP://WWW.SAIL-PROJECT.EU](http://www.sail-project.eu).

- [4] J. CHABAREK, J. SOMMERS, P. BARFORD, C. ESTAN, D. TSIANG, AND S. WRIGHT, „POWER AWARENESS IN NETWORK DESIGN AND ROUTING“, IEEE INFOCOM, CITESEER, 2008.

- [5] [HTTP://WWW.IST-NOBEL.ORG](http://www.ist-nobel.org)

- [6] [HTTP://WWW.NETINF.ORG](http://www.netinf.org)



**Matthias Herlich, M. Sc.** beendete 2009 sein Masterstudium an der Universität Paderborn und ist momentan Doktorand der International Graduate School Dynamic Intelligent Systems. Er forscht im Fachgebiet „Rechnernetze“ an energieeffizienten Netzen.



**Dipl.-Inf. Christian Dannewitz** arbeitet seit 2005 am Lehrstuhl für „Rechnernetze“ an der Universität Paderborn und promoviert dort zurzeit. Sein Forschungsgebiet sind zukünftige Internet-Architekturen mit dem Fokus auf informationszentrischen Netzen.

#### Kontakt

**Prof. Dr. rer. nat. Holger Karl**

**Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik**

**Institut für Informatik**

**05251 60-5375**

**[holger.karl@upb.de](mailto:holger.karl@upb.de)**

# Elektromobilität in Paderborn

## Kerntechnologien für Automobile von morgen

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Dipl.-Ing. Tobias Huber, Dipl.-Ing. Christoph Romaus, Dipl.-Ing. Andreas Specht

**Das Thema der Elektromobilität genießt derzeit starke Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit. Dieser Begriff steht für einen Paradigmenwechsel in der Antriebstechnologie des Automobils. Statt verbrennungsmotorischer Antriebe, welche auf Kohlenwasserstoffe als Energieträger angewiesen sind, sollen durch Nutzung elektrischer Energie Emissionen von Schadstoffen und CO<sub>2</sub> verringert und fossile Energiereserven geschont werden. Damit elektrische Fahrzeuge diesen Ansprüchen gerecht werden können, ist freilich noch eine Vielzahl von Problemen zu überwinden.**

Elektrische Fahrzeuge lagen vor hundert Jahren gegenüber verbrennungsmotorischen teilweise vorn. Erst die Erfindung des elektrischen Anlassers gab kurioserweise den Verbrennungsmotoren eine entscheidende Starthilfe. Abbildung 1 zeigt den so genannten Lohner-Porsche auf der Weltausstellung in Paris im Jahre 1900, den der damals bei der Firma Lohner tätige 25-jährige Konstrukteur Ferdinand Porsche entwickelt hatte. Dieses Batteriefahrzeug war bereits mit Radnabenmotoren ausgerüstet, in einer Rennversion sogar alle vier Räder. Heute sind Batteriefahrzeuge wieder Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung (Abbildung 2). Ein Batteriefahrzeug ist zwar völlig emissionsfrei; in Bezug auf die Bilanz der gesamten Energieerzeugungskette ist es einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug aber nicht grundsätzlich überlegen. Über die elektrische Energie gelingt jedoch die Nutzung regenerativer Quellen wie z. B. Wind- oder Wasserkraft. Durch gesteuertes Laden können tageszeitlich sonst nicht verwertbare Kapazitäten, ggf. auch



Abb. 1: Elektrofahrzeug 1900: Der Lohner-Porsche mit Radnabenmotoren auf der Weltausstellung 1900 in Paris, 50 km/h Höchstgeschwindigkeit, ca. 50 km Reichweite.



**Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker** leitet seit 2003 das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) an der Universität Paderborn. Er studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte dort 1988. Zwischen 1988 und 2001 arbeitete er zunächst im AEG Forschungsinstitut und später in der Daimler Konzernforschung in Berlin, wo er im dortigen Labor für Antriebstechnik und Leistungselektronik die Gruppe Regelungstechnik leitete.

solche aus konventionellen Quellen, sinnvoll genutzt werden.

Das lange propagierte Brennstoffzellenfahrzeug schneidet bezüglich der Energie-Prozesskette und der aufwändigen Infrastruktur für Wasserstoff ungünstiger ab als das Batteriefahrzeug und steht bei vielen Fahrzeugherstellern daher nicht mehr primär im Fokus.

Neben den reinen Elektrofahrzeugen werden in Hybridfahrzeugen elektrische Antriebe mit dem klassischen Verbrennungsmotor kombiniert und verbessern auf diese Weise die Energieeffizienz und Performanz. Hier haben sich mittlerweile vielfältige Strukturen entwickelt: Die Spanne reicht vom Micro-Hybrid in der Struktur eines Parallel-Hybrids (Abbildung 3) mit einem kleinen Elektroantrieb, der als Starter und Bordnetzgenerator fungiert und ggf. auch ein wenig das



Abb. 2: Elektrofahrzeug 2009: Mini-E, Batterie 35 kWh, 150 kW Asynchronmotor, 152 km/h Höchstgeschwindigkeit, ca. 170 km Reichweite.

Quelle: BMW

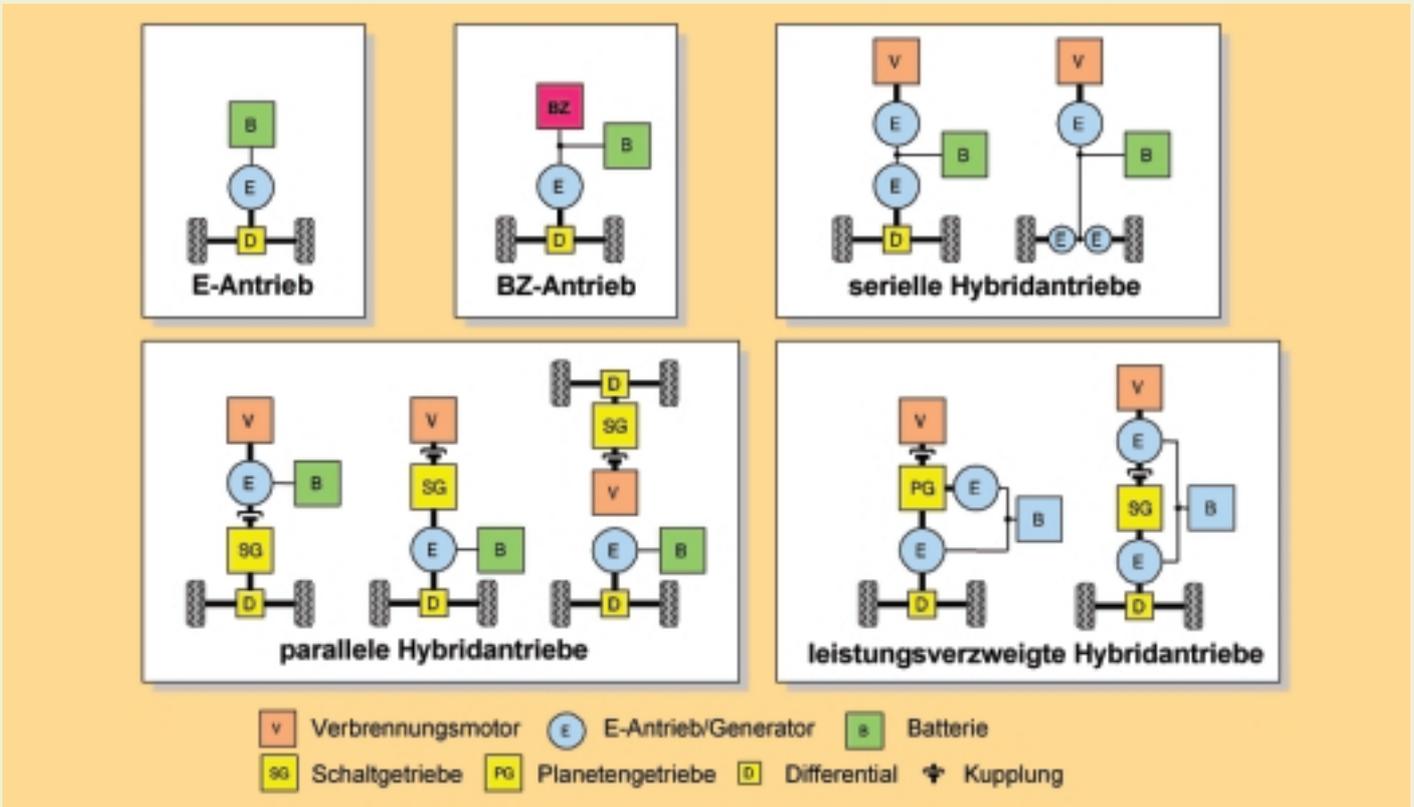


Abb. 3: Strukturen elektrischer und hybrider Antriebssysteme.

Anfahren unterstützt, über den Full-Hybrid in Parallel- oder leistungsverzweigter Struktur, der teilweise auch rein elektrisch fahren kann, bis hin zum anderen Extrem, dem Range Extender in Serienhybrid-Struktur, bei dem ein kleiner Verbrennungsmotor lediglich der Reserve für den Fall einer erschöpften Batterie dient. In Nutzfahrzeugen erlauben Hybridantriebe neue konstruktive Lösungen wie die relativ einfache Verteilung der Antriebsleistung auf mehrere Achsen mittels einer Serienhybrid-Struktur (z. B. in Gelenkbussen). Allen diesen neuartigen Konzepten ist gemein, dass es auf höchste Effektivität und Effizienz ankommt. Obwohl viele der einzelnen Fragestellungen nicht grundsätzlich neu sind – als Beispiel seien bewährte elektrische Flurförderfahrzeuge genannt – zeigt sich, dass vorhandene Standardlösungen für die speziellen Anforderungen der Straßenfahrzeuge suboptimal sind. Die Systeme und Komponenten müssen genau für die Bedürfnisse des Straßenfahrzeugs optimiert werden. In diesem Kontext seien zwei Schwerpunkte der Forschungsarbeiten im Fachgebiet LEA näher erläutert:

### Elektrischer Antrieb

Bei der Auswahl des geeigneten elektrischen Motors für automobiler Anwendungen spielen mehrere Kriterien eine Rolle: Der Wirkungsgrad ist neben der Leistungs- und Drehmomentendichte von entscheidender Bedeutung. Im Vergleich mit einem vollen Benzintank ist der Energieinhalt einer Batterie sehr knapp bemessen, sodass alle elektrischen Komponenten mit maximaler Effizienz arbeiten und gleichzeitig auch möglichst leicht sein müssen. Die elektrische Maschine als eine der schwersten und leistungsstärksten Einzelkomponenten ist davon im Besonderen betroffen.

Hinzu kommt, dass insbesondere im Antriebsstrang hybrider Fahrzeuge wenig Bauraum zur Verfügung steht, sodass eine hohe Leistungsdichte nicht nur bezüglich des Gewichts, sondern auch bezogen auf das Volumen gefordert wird. Weitere Kriterien, die in automobilen Anwendungen allgemein eine Rolle spielen, sind Kosten, Zuverlässigkeit und Geräuschentwicklung. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ist hier das Ziel, möglichst leise, akustisch unauffällige Antriebe zu entwickeln.

Die Gleichstrommaschine wird zwar für Kleinantriebe, auch im Automobil, noch vielfach eingesetzt, als Traktionsmaschine ist sie aufgrund des mechanischen Kommutators, der resultierenden Baugröße und des Wartungsbedarfs kein ernsthafter Kandidat. Durch die Verfügbarkeit moderner leistungselektronischer Wechselrichter konnten sich stattdessen die Drehstromantriebe etablieren. Tabelle 1 stellt die einzelnen Maschinentypen GM (Gleichstrommaschine), ASM (Asynchronmaschine), GRM (geschaltete Reluktanzmaschine) sowie PMSM (permanent-erregte Synchronmaschine) dar.

Aktuell ist die PMSM der favorisierte Maschinentyp. Das hängt vor allem mit den großen Fortschritten bei den Permanentmagnetmaterialien zusammen. Moderne Seltenerd-magnete bestehen aus einer Legierung aus Neodym, Eisen und Bor oder auch aus Samarium-Kobalt und können sehr hohe magnetische Feldstärken erzeugen. Mithilfe dieser Magnete ist die Konstruktion sehr kompakter, leistungsfähiger und effizienter Synchronmaschinen möglich. Hierbei bietet die Einbettung der Magnete in die Rotorstruktur (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IPMSM) gegenüber der Oberflächenmontage ein günstigeres Drehmoment-Drehzahl-Verhalten sowie produktionstechnische Vorteile. Auch

|   | GM  | ASM | GRM | PMSM |
|---|-----|-----|-----|------|
| Kosten  | 🔴🔴  | 🟢   | 🟢   | 0    |
| Leistungs- und Drehmomentdichte               | 🔴🔴  | 0   | 0/🟢 | 🟢    |
| Wirkungsgrad                                  | 0/🟢 | 0   | 🟢   | 🟢    |
| Robustheit (Temperatur, Vibrationen, Schmutz) | 🔴   | 🟢   | 🟢🟢  | 0    |
| Geräusche                                     | 0   | 🟢   | 🔴🔴  | 0    |
| Stromrichteraufwand                           | 🟢   | 0   | 🔴🔴  | 0    |
| Regelungsaufwand                              | 🟢   | 🟢   | 🔴🔴  | 0    |

Tabelle 1: Vergleich verschiedener elektrischer Antriebe.

die Ausführung der elektrischen Wicklung als Einzelzahnwicklung (diese Wicklungsart findet man auch bei der geschalteten Reluktanzmaschine) kommt einer kompakten Bauform und einem einfachen Produktionsprozess entgegen. Auf diese Weise können Mehrkosten aufgrund des Permanentmagnetmaterials teilweise kompensiert werden. Die Vorteile der hohen Leistungsdichte und der Effizienz der IPMSM überwiegen die Nachteile. Diese liegen insbesondere im deutlich komplizierteren Betriebsverhalten beispielsweise im Vergleich mit der Asynchronmaschine. Die Regelung (Abbildung 4) wird entsprechend aufwändiger und benötigt folglich einen höheren Rechenaufwand und damit mehr Prozessorleistung.

Die Aufgabe der Regelung besteht darin, ein gewünschtes Drehmoment  $T^*$  bei verschiedenen Motordrehzahlen bzw. Fahrgeschwindigkeiten schnell und präzise einzustellen (der Stern bezeichne im Folgenden jeweils den gewünschten Wert, den Sollwert, den die tatsächliche Größe (ohne Stern) annehmen möge).

Die Funktionsweise solch einer IPMSM-Regelung hat dabei im Prinzip Ähnlichkeit mit der Regelung eines fremderregten Gleichstrommotors. Dabei wird ein Strom-Sollwert berech-

net, der beim gegebenen Motor das gewünschte Soll-Drehmoment bewirkt und daher mittels einer unterlagerten Stromregelung im Motor einzuprägen ist. Die Stromregelung vergleicht dazu ständig den gemessenen Motorstrom mit dem Strom-Sollwert und erhöht oder verringert dementsprechend die am Motor angelegte Spannung. Dadurch werden die Ströme und damit auch das Drehmoment auf ihre Sollwerte eingeregelt und auch unter Einfluss von Störungen weitestgehend gehalten.

Während Ströme und Spannungen beim Gleichstrommotor als Gleichgrößen vorliegen und somit mit klassischen Regelungsansätzen einfach behandelt werden können, hat man es bei der dreiphasigen IPMSM mit Wechselgrößen zu tun. Die Regelung von Wechselgrößen ist aufgrund der begrenzten Schnelligkeit klassischer Regelungen schwierig, weshalb man sich eines mathematischen Tricks bedient: Durch Abbildung (Koordinatentransformation) der elektrischen Statorgrößen (abc) in ein sich mitdrehendes rotorfestes Koordinatensystem (dq) ändert sich die Perspektive auf das elektrische System des IPMSM, wodurch ein Übergang von Wechsel- zu Gleichgrößen ermöglicht wird. Die Stromregelung kann dann völlig analog zu der des Gleichstrommotors in diesem Koordinatensystem aufgebaut werden. Anschließend müssen die durch den Regler berechneten Spannungen wieder in das statorfeste Koordinatensystem zurückgerechnet und an den Klemmen des Motors angelegt werden. Die sinnvolle Wahl des Sollstromes bzw. des Arbeitspunktes  $i_d^*, i_q^*$ , mit dem ein gewünschtes Drehmoment  $T^*$  gestellt werden kann, ist bei der IPMSM im Gegensatz zum Gleichstrommotor jedoch nicht so trivial, was hauptsächlich auf elektrische Asymmetrien (Sättigungseffekte, Induktivitätsverteilung) im Motor zurückzuführen ist. In der Regel wird durch Vermessung der IPMSM ein Motorkennfeld generiert, auf dessen Basis die Arbeitspunktwahl realisiert werden kann. Abbildung 5 zeigt ein solches Kennfeld. Man kann anhand der Linien des konstanten Drehmoments (grün) erkennen, dass die Abbildung des Drehmoments  $T$  auf den

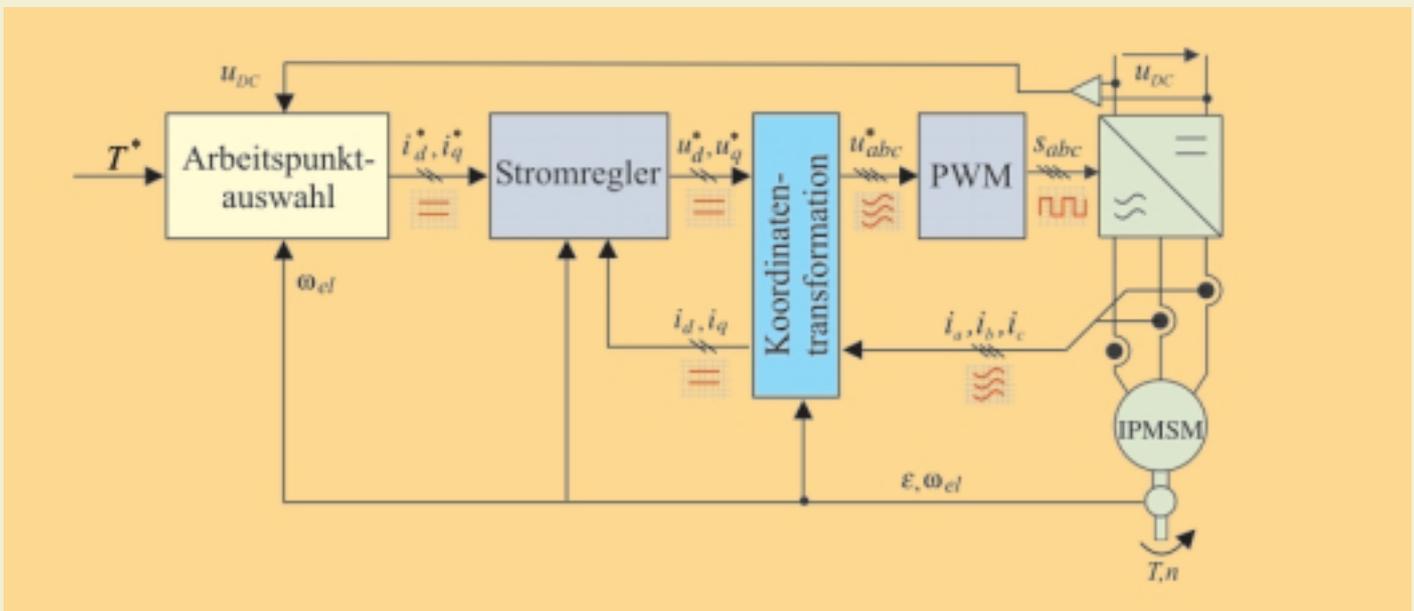


Abb. 4: Schematische Regelungsstruktur für einen IPMSM.

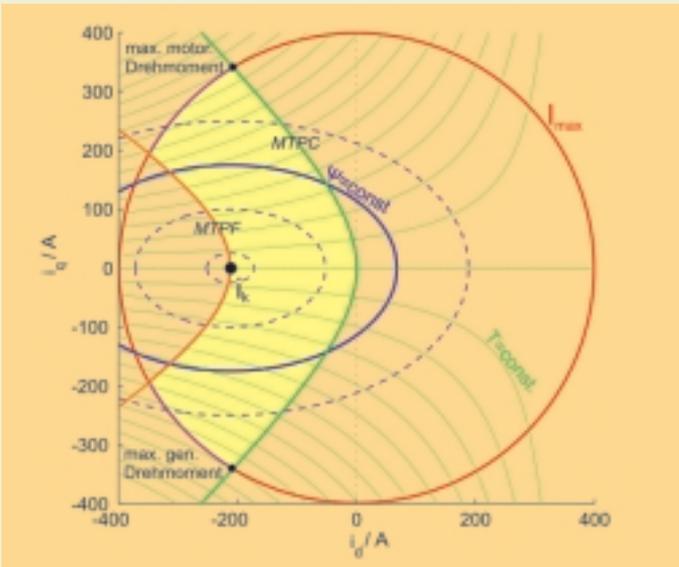


Abb. 5: Kennfelder einer IPMSM in dq-Stromkoordinaten.

Arbeitspunkt  $i_d$ ,  $i_q$  nicht eindeutig ist. Es können also unterschiedliche Arbeitspunkte ausgewählt werden, um das gewünschte Drehmoment zu stellen. Dieser Freiheitsgrad wird genutzt, um unter Berücksichtigung der gegebenen Strom- und Spannungsgrenzen (rot und lila) einen „optimalen“ Arbeitspunkt  $i_d$ ,  $i_q$  innerhalb eines sinnvollen Betriebsbereichs des Motors (gelb) auszuwählen. Hierzu muss eine Zielfunktion als Optimierungskriterium festgelegt werden, z. B. die Minimierung der Stromwärmeverluste. Auf diese Weise ergibt sich dann ein eindeutig festgelegter Arbeitspunkt.

Das Einprägen der Sollströme  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  im Motor wird durch die der Arbeitspunktwahl nachgeschaltete Stromregelung gewährleistet. Dazu werden die Sollströme mit den Messwerten der in dq-Koordinaten transformierten Motorströme  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  verglichen und entsprechende Stellsignale in Form von Sollspannungen  $u_d^*$ ,  $u_q^*$  berechnet.

Abbildung 6 zeigt einen typischen Anregelvorgang der Motorströme  $i_d$ ,  $i_q$  bei Aufschalten eines Sollwertsprungs  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  durch die Arbeitspunktwahl. In nur zwei bis drei Millisekunden werden die neuen Stromsollwerte und damit auch

das neue Drehmoment eingestellt.

Die Sollspannungen  $u_d^*$ ,  $u_q^*$  werden nun wieder auf statorfeste abc-Größen abgebildet und einer Pulsweitenmodulation (PWM) zugeführt. Die PWM generiert aus den Spannungssollwerten  $u_a^*$ ,  $u_b^*$ ,  $u_c^*$ , binäre Steuersignale  $s_a$ ,  $s_b$ ,  $s_c$ , deren zeitliche Mittelwerte wieder genau den Spannungssollwerten entsprechen. Diese Steuersignale steuern die nur schaltend betriebenen Transistoren des leistungselektronischen Stellgliedes, des Wechselrichters, welcher auf diese Weise die von der Traktionsbatterie bereitgestellte Gleichspannung  $u_{DC}$  in die für den Elektromotor benötigte Drehspannung umformt.

### Energiespeicher

Der Energiespeicher ist die teuerste und momentan die limitierende Komponente in Elektrofahrzeugen. Er ist entscheidend für die Reichweite, die Leistungsfähigkeit und das Gewicht des Fahrzeugs.

Typischerweise wird heute ein reiner Batteriespeicher in Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) eingesetzt. Batterien zeichnen sich unter den elektrischen Energiespeichern durch die Fähigkeit aus, vergleichsweise große Energiemengen speichern zu können. Ihre Energiedichte ist allerdings verglichen mit chemischen Treibstoffen immer noch etwa zwei Größenordnungen geringer. Nachteilig ist, dass Leistung und Zyklfestigkeit von Batterien durch die zugrundeliegende elektrochemische Form der Energiespeicherung sehr begrenzt sind (Abbildung 7). Wird eine Batterie bezüglich des Energieinhalts bewusst sparsam bemessen (z. B. für einen Zweitwagen mit beschränkter Reichweite oder für ein Hybridfahrzeug), steht daher auch nur eine geringe elektrische Leistung zur Verfügung.

Eine Hybridisierung des Energiespeichers mittels Doppelschichtkondensatoren (DLC) kann hier Abhilfe schaffen. Kondensatoren speichern die elektrische Energie in einem elektrostatischen Feld und zeichnen sich im Gegensatz zu Batterien durch eine hohe spezifische Leistung und hohe Zyklfestigkeit aus, können jedoch nur geringe Energiemengen speichern. Beide Speicher können also ideal zu einem hybriden Energiespeichersystem kombiniert werden,

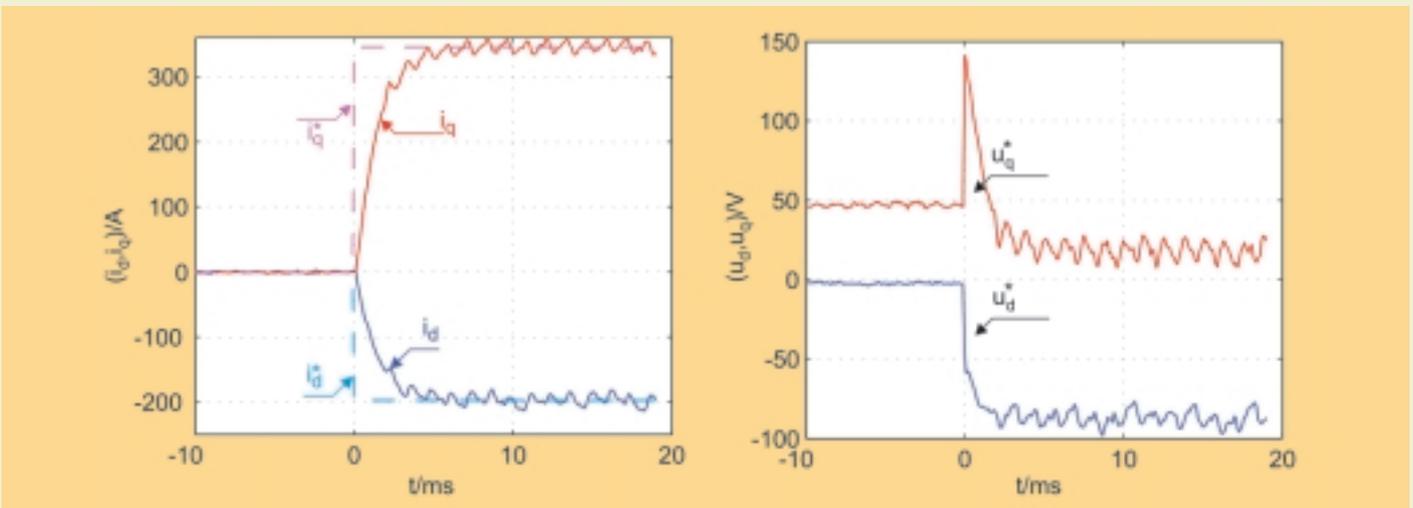


Abb. 6: Anregelvorgang bei Aufschalten eines Sollwertsprungs  $i_d^*$ ,  $i_q^*$ .

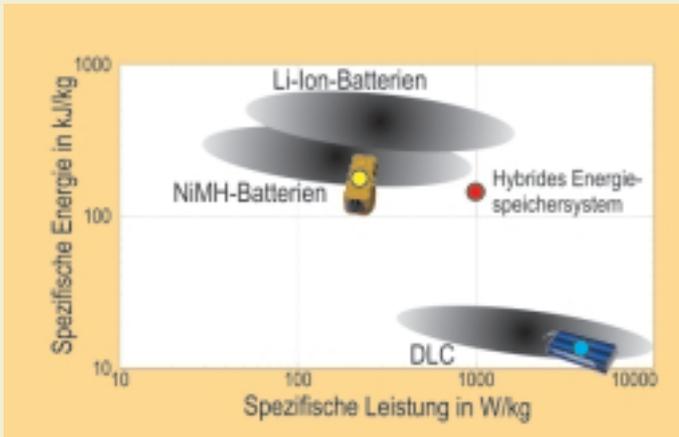


Abb. 7: Energie und Leistung verschiedener elektrischer Speicher.

das sowohl eine adäquate Reichweite als auch eine hohe Leistungsfähigkeit und damit Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs ermöglicht. Die sich ergebende Struktur ist in Grafik 8 dargestellt.

Durch die hybride Struktur des Energiespeichersystems ergeben sich zwei Fragestellungen:

1. Wie sind Batterie und Doppelschichtkondensator ideal zu dimensionieren?
2. Wie ist die Antriebsleistung des Fahrzeugs im Betrieb ideal auf beide Speicher zu verteilen?

Da die Auslegung des Energiespeichersystems und die Betriebsstrategie einen direkten Einfluss aufeinander haben, müssen im Prinzip beide gleichzeitig optimiert werden. Ziel ist dabei in beiden Fällen, die Verluste des Energiespeichers zu minimieren und damit den Wirkungsgrad zu optimieren.

Die erste Frage kann zum Beispiel mithilfe der Dynamischen Programmierung gelöst werden, einem Optimierungsverfahren, das eine optimale Betriebsstrategie unter Kenntnis des kompletten Fahrzyklus bestimmt. Hierzu wurden Fahrprofile im städtischen und stadtnahen Umfeld von Paderborn per GPS aufgezeichnet und anschließend über eine Simulation der Leistungsbedarf des Fahrzeugs bestimmt. Als Referenz diente eine Antriebsbatterie, die ein Gewicht von 400 Kilogramm aufweisen muss, um die notwendige Spitzenleistung von 90 Kilowatt bereitstellen zu können.

Für das hybride Energiespeichersystem hingegen wurde die Batterie als Langzeitspeicher ausschließlich auf Basis der gewünschten Reichweite von 60 Kilometer dimensioniert.

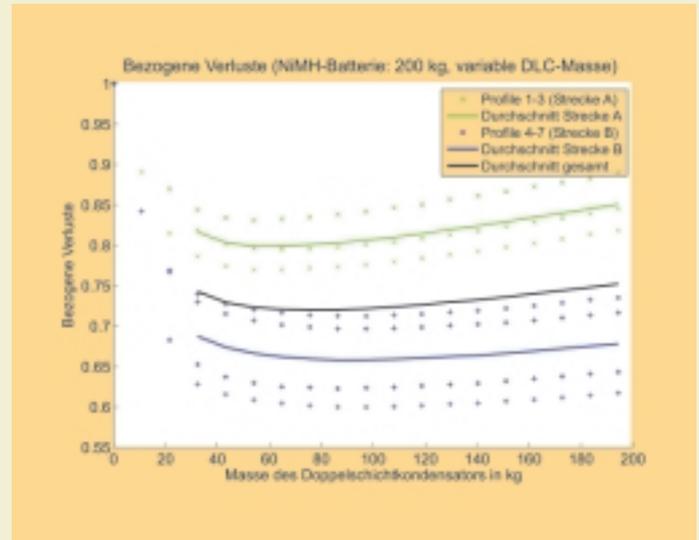


Abb. 9: Parameterstudie über die Abhängigkeit der Verluste von der Größe des Doppelschichtkondensators.

Die notwendige Größe des Doppelschichtkondensators, der die Leistungsspitzen puffern soll, wurde dann über eine Parameterstudie bestimmt (Abbildung 9).

Eine Nickel-Metallhydridbatterie von 200 Kilogramm und ein Kondensator von 54 Kilogramm ermöglichen eine Reduktion der Verluste im Speichersystem zwischen 17 und 39 Prozent. Durch das verringerte Gewicht kann der Verbrauch des Fahrzeugs weiterhin um sechs Prozent gesenkt werden.

Die zweite Frage nach der Aufteilung der Antriebsleistung auf die Speicher im Betrieb kann nur mittels suboptimaler Betriebsstrategien gelöst werden, die robust gegenüber den auftretenden Störungen sind. Insbesondere der zukünftige Leistungsverlauf unterliegt stochastischen Einflüssen des Straßenverkehrs, wie z. B. Überholvorgängen, roten Ampeln oder gar unterschiedlichen Streckenverläufen. Um diese optimal berücksichtigen zu können, wurde das verwendete Optimierungsverfahren zur Stochastischen Dynamischen Programmierung erweitert. Diese verwendet anstelle des exakten Leistungsprofils nur die stochastischen Eigenschaften vergangener Fahrten, um vom aktuellen Fahrzustand auf zukünftige Zustände zu schließen und hierfür die erwarteten Verluste zu minimieren. Dieses Verfahren ist online auf einem Fahrzeug einsetzbar. In Testsimulationen konnten die Verluste gegenüber dem Referenzsystem insbesondere auf Fahrzyklen mit hohem Anteil an Bremsleistung um bis zu 31

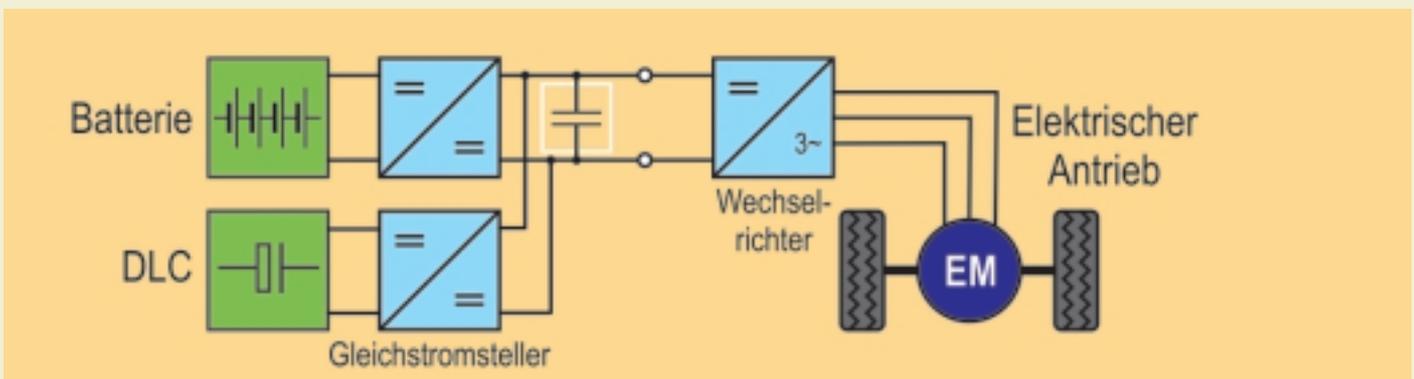


Abb. 8: Struktur des hybriden Energiespeichersystems.



Abb. 10: Elektrofahrzeug mit hybridem Energiespeichersystem (Studentenprojekt).

Prozent reduziert werden.

Diese dargestellten Forschungsarbeiten und andere, in dieser Übersicht nicht erwähnte Aspekte elektrischer und hybrider Fahrzeugantriebe sind derzeit Gegenstand mehrerer Projekte am Fachgebiet, die aus verschiedenen Quellen finanziert werden (DFG, Fördermittel des Landes NRW, Direktaufträge aus der Industrie).

Die Studenten werden im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik nicht nur durch Bachelor- und Master-Arbeiten, sondern auch in Form von Projektseminaren an relevante Themen herangeführt. Auch das hybride Energiespeichersystem wurde in einem solchen Projektseminar in einem kleinen Elektrofahrzeug durch eine Studentengruppe in die Praxis umgesetzt (Abbildung 10).

### Literatur

D. SCHRÖDER, „ELEKTRISCHE ANTRIEBE – REGELUNG VON ANTRIEBSSYSTEMEN“, 3. AUFLAGE, SPRINGER, 2009.

T. KNOKE, „OPTIMALER ENTWURF UND BETRIEB HYBRID-ELEKTRISCHER FAHRZEUGANTRIEBE AM BEISPIEL VON ABFALLSAMMELFAHRZEUGEN“, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

S. MORIMOTO, Y. TAKEDA, T. HIRASA, K., TANIGUCHI, „EXPANSION OF OPERATING LIMITS FOR PERMANENT MAGNET MOTOR BY CURRENT VECTOR CONTROL CONSIDERING INVERTER CAPACITY“, IEEE TRANS. IND. APPL., VOL. 26, NO. 5, SEPT./OCT. 1990.

M. MEYER, „WIRKUNGSGRADOPTIMIERTE REGELUNG HOCH AUSGENUTZTER PERMANENTMAGNET-SYNCHRONMASCHINEN IM ANTRIEBSSTRANG VON AUTOMOBILEN“, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

M. MEYER, J. BÖCKER, „OPTIMUM CONTROL FOR INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS (IPMSM) IN CONSTANT TORQUE AND FLUX WEAKENING RANGE“, 12TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE (EPE-PEMC), AUGUST 2006, PORTOROZ, SLOWENIEN.

C. ROMAUS, K. GATHMANN, J. BÖCKER, „OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT FOR A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR

ELECTRIC VEHICLES BASED ON STOCHASTIC DYNAMIC PROGRAMMING“, VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC), SEPT. 2010, LILLE/FRANKREICH.

C. ROMAUS, J. BÖCKER, K. WITTING, A. SEIFRIED, O. ZNAMENSHCHYKOV, „OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT FOR A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM COMBINING BATTERIES AND DOUBLE LAYER CAPACITORS“, ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), SEPT. 2009, SAN JOSE, USA.



**Dipl.-Ing. Tobias Huber** ist seit Mai 2009 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn tätig. Schwerpunktmäßig befasst er sich hier mit der Modellierung und Regelung von permanent-erregten Synchronmotoren. Seine Diplomarbeit schloss Tobias Huber an der Universität Karlsruhe im Bereich der nichtlinearen Querdynamikregelung von KFZ ab.



**Dipl.-Ing. Christoph Romaus** ist seit September 2010 Akademischer Rat im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik. Er studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der RWTH Aachen. Danach war er seit 2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet LEA und erforschte selbstoptimierende Regelungsstrategien für das Energiemanagement eines hybriden Energiespeichersystems aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren.



**Dipl.-Ing. Andreas Specht** ist seit Oktober 2007 am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Temperaturmodellierung von permanent-erregten Synchronmotoren. Sein Studium der Elektrotechnik hat Andreas Specht an der TU Dresden abgeschlossen.

### Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker**

**Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik**

**Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik**

**05251 60-2209**

**boecker@lea.upb.de**

# UNI Paderborn

Heute noch Schule ...

MINT

Mathematik  
Informatik

Naturwissenschaften  
Technik



... morgen schon MINT

[www.uni-paderborn.de/mint-studieren](http://www.uni-paderborn.de/mint-studieren)

- ▶ MATHEMATIK
- ▶ INFORMATIK
- ▶ CHEMIE
- ▶ PHYSIK
- ▶ ELEKTROTECHNIK
- ▶ MASCHINENBAU