

FORSCHUNGS FORUM

PADERBORN



UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Jubiläumsausgabe 10-2007

P A D E R B O R N E R U N I V E R S I T Ä T S M A G A Z I N



- | | |
|--|---|
| ■ Neue Hoffnung für Herzranke | ■ Nie wieder Auto waschen |
| ■ Optimierung des Personennahverkehrs | ■ IT-Produkte zuverlässig machen |
| ■ Quantisierung chaotischer Systeme | ■ Sonderforschungsbereich Transregio |

Orga Systems.

Orga Systems, Erfinder des Vorausbezahlten Telefonierens in GSM-Mobilfunknetzen, entwickelt Komplettsysteme für die echtzeitbasierte Vergebüchung mobiler Telekommunikationsdienste.

Unser größtes System betreiben wir in Italien. Dort werden die Mobilfunkdienste von nahezu 30 Millionen Teilnehmern in Echtzeit vergbührt. Das ist seit Jahren unangefochtener Weltrekord. Solche hoch performanten Software-Lösungen werden nur durch eine von uns entwickelte InCore-Datenbank und massiv parallele Rechner-Architekturen (teilweise bis zu 64 Hochleistungsprozessoren pro Server) möglich.

Außer Produkten und Lösungen für das Vorausbezahlte Nutzen von Mobilfunkdiensten (Prepaid), entwickeln wir auch Systeme für konvergente Bezahlmethoden, die einen variablen Wechsel zwischen Vorausbezahlen bzw. der Abrechnung am Monatsende erlauben. Natürlich echtzeit-basiert.

Über 40 Mobilfunkbetreiber, darunter Vodafone, Orange, TIM, America Movil, e-plus oder Base, mit über 160 Millionen

Nutzern vertrauen auf unsere Lösungen – Tendenz steigend.

Weltweit hat Orga Systems über 450 Mitarbeiter.

Hauptentwicklungsstandort für die hochkomplexen Investitionsgüter ist der Standort Paderborn. Hier werden gegenwärtig 260 Mitarbeiter, davon nahezu 70% mit universitärem Bildungshintergrund beschäftigt.

Die Zusammenarbeit mit den Informatikbereichen der Paderborner Universität sind wesentlicher Bestandteil unserer Personalentwicklung. Wir sehen in der Zusammenarbeit mit regionalen und internationalen Universitäten und Hochschulen einen entscheidenden Wachstumsmotor.

Weitere Standorte in Berlin, Rom, Madrid, Istanbul, Rio de Janeiro und Kiew unterstreichen unsere internationale Ausrichtung.

orga-systems.com



all4 billing

IMPRESSUM

Herausgeber

Prof. Dr. Nikolaus Risch
Rektor der Universität Paderborn

Konzeption und Redaktion

Ramona Wiesner
Leiterin des Referats Hochschulmarketing
und Universitätszeitschrift
Warburger Str. 100, 33098 Paderborn
Tel.: 05251/60 2553, 3880
E-Mail: wiesner@zv.uni-paderborn.de
<http://www.uni-paderborn.de/hochschulmarketing/>

ForschungsForum Paderborn (ffp) im Internet

<http://www.uni-paderborn.de/ffp/>

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. techn. Gitta Domik
Prof. Dr. phil. Jörg Jarnut
Prof. Dr.-Ing. Klaus Meerkötter
Prof. Dr. rer. pol. Winfried Reiß
Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Schäfer
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Voß
Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
Prof. Dr. rer. nat. Artur Zrenner

Drucklegung

Januar 2007

ISSN (Print) 1435-3709

Layout

PADA-Werbeagentur
Heierswall 2, 33098 Paderborn

Anzeigenverwaltung

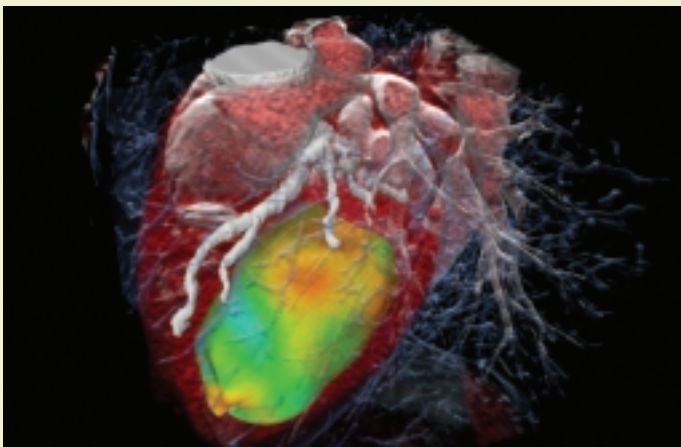
PADA-Marketingverlag
Heierswall 2, 33098 Paderborn
Tel.: 05251/527577

Auflage

5 000

Titel

Neue Hoffnung für Herzranke – Volumenrendering für die Gesundheit, Seite 6 (Zusammenarbeit des Instituts für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung am Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen und der Fachgruppe Computergrafik, Visualisierung und Bildverarbeitung am Institut für Informatik der Universität Paderborn.)



Editorial



Ramona Wiesner
Referentin für Öffentlichkeitsarbeit

Liebe Leserinnen und Leser,
im letzten Jahr strömten rund 185 000 Gäste aus dem ganzen Bundesgebiet, Italien und anderen europäischen Staaten nach Paderborn, um die große historische Ausstellung „Canossa 1077 – Erschütterung der Welt. Geschichte, Kunst und Kultur am Aufgang der Romanik“ zu sehen. Vielleicht waren auch Sie in der Domstadt und haben die Kostbarkeiten aus aller Welt bewundert? Dann wird es Sie interessieren, dass sich die gelungene Präsentation dieser spannenden und historisch eminent wichtigen Epoche auf ein gleichnamiges universitäres Forschungsprojekt stützen konnte. Lesen Sie ab Seite 12, welche neuen Erkenntnisse die aus Historikern und Germanisten der Universität Paderborn bestehende Projektgruppe mit ihren vergleichenden Forschungen zum Staat-Kirche-Verhältnis über das Schlüsselereignis Canossa gewann.

„Neue Hoffnung für Herzranke“ titelt unser Beitrag auf Seite 6, der Sie sicherlich ebenfalls fesselt. Er erläutert, inwieweit es bereits heute möglich ist, bei der Diagnostik koronarer Herzerkrankungen auf den herkömmlichen Eingriff der Koronarangiographie zu verzichten. Dank der Verwendung aktueller Aufnahmetechniken in Verbindung mit modernen Darstellungsverfahren dürfen Patienten auf eine schonende Analyse von Herzkranzgefäßen und Herzmuskel hoffen.

Eine Hoffnung ganz anderer Art können sich alle Autobesitzer und Liebhaber von Aluminiumfelgen machen: Vielleicht gehört das mühsame Putzen der Radzierblenden und Polieren des Lackes schon bald der Vergangenheit an. Denn die Arbeitsgruppe „Chemie und Technologie der Beschichtungsstoffe“ (CTB) um Prof. Wolfgang Bremser widmet sich dem Phänomen der selbstreinigenden Oberflächen. In Kooperation mit Partnern aus der Industrie haben die Forscher neuartige Lackierungen mit verbesserten Eigenschaften entwickelt. Ab Seite 26 erfahren Sie, wie es den Paderbornern in Langzeittests und unter Laborbedingungen gelungen ist, einen Beitrag zur Verbesserung technischer Oberflächen zu leisten.

Um höchste Qualität dreht sich auch die Arbeit des Software Quality Lab (s-lab). Ob elektronisch gesteuerte Haushaltsgeräte, hoch technisierte Autos oder PC-Systeme am Arbeitsplatz – unser Alltag ist mittlerweile geprägt von Computern. Und so richtet sich das Forschungsinteresse der Informatiker unter anderem auf die Qualität der Software. Ist sie einfach zu bedienen? Tut sie, was man von ihr erwartet? Und kann der Anwender die Software seinen Bedürfnissen anpassen oder sie sogar selbst entwickeln? Am Beispiel vom Tabellenkalkulationsprogramm Excel erläutert das Team des s-lab ab Seite 56, dass Qualitätssicherung bei der Erstellung von Software ein wichtiges Thema ist.

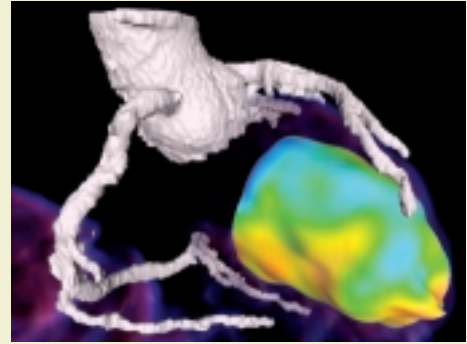
Mit der vorliegenden Ausgabe des ForschungsForums feiern wir ein kleines Jubiläum. Bereits zum zehnten Mal berichten wir über zukunftsweisende Forschungen made in Paderborn.

Viel Spaß beim Lesen
Ihre Ramona Wiesner

Seite 6

Neue Hoffnung für Herzranke*Volumenrendering für die Gesundheit*

Prof. Dr. med. Wolfgang Burchert, Prof. Dr. techn. Gitta Domik,
Dr. med. Eva Fricke, Dr. rer. biol. hum. Harald Fricke,
Dipl.-Inform. Frank Götz, Dipl.-Ing. Reiner Weise



Seite 12

Das „Canossa“-Zeitalter*Zwischen historischer Wirklichkeit und Geschichtskonstruktion*

Prof. Dr. phil. Frank Göttmann, Prof. Dr. phil. Dietmar Klenke,
Prof. Dr. phil. Jörg Jarnut, Prof. Dr. phil. Stephan Müller



Seite 20

Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr*Theorie und Praxis verbinden*

Jun.-Prof. Dr. rer. pol. Natalia Klierer



Seite 26

Nie wieder Auto waschen?!*Entwicklung selbstreinigender Lackierungen*

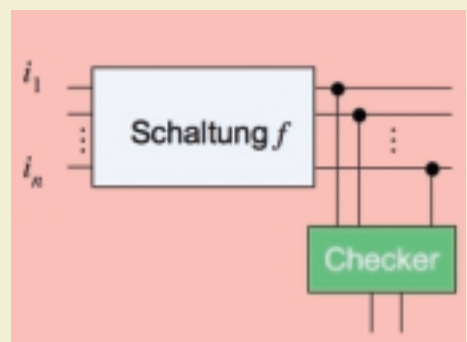
Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser, M. Sc. Björn Weber



Seite 30

Qualitätssicherung für Nanochips*Wie IT-Produkte zuverlässig werden*

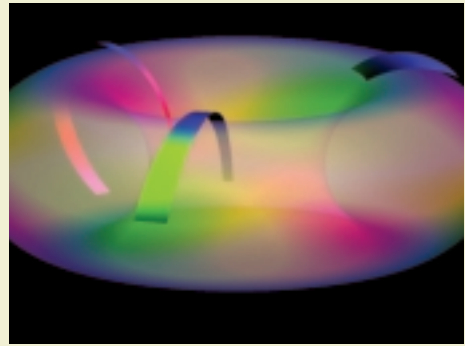
Prof. Dr. rer. nat. Sybille Hellebrand



Seite 36

Chaos in der Quantenmechanik*Quantisierung chaotischer Systeme*

Prof. Dr. rer. nat. Joachim Hilgert, Dr. rer. nat. Florian Rilke



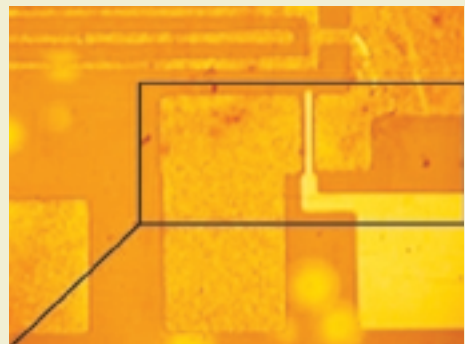
Seite 40

„Musterprozesse“ in der Medienentwicklung*Eine interdisziplinäre Sichtweise*

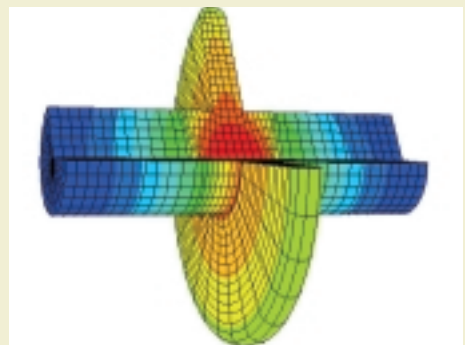
Prof. Dr. phil. Bardo Herzig



Seite 44

**Optische Technologien für
die Informationsgesellschaft***Naturwissenschaftler und Ingenieure forschen gemeinsam
am neuen Center for Optoelectronics and Photonics
Paderborn (CeOPP)*Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hilleringmann, Prof. Dr. phil. Klaus Lischka,
Prof. Dr. rer. nat. Heinz-S. Kitzerow

Seite 50

**Funktional gradierte
Materialien und Strukturen***Neuer Sonderforschungsbereich im Maschinenbau*Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier,
Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Seite 56

Software-Qualität – überall!*Excel-lente Software*Jan-Christopher Bals, Fabian Christ,
Prof. Dr. rer. nat. Gregor Engels, Stefan Sauer

	D6		f _r = C6*E2
	A	B	C
1	Rechnung		
2			Mws
3			Rab
4	Nr.	Artikel	Netto Preis
5	1	Bildschirm	239,95 €
6	2	Kamera	199,85 €

Feiern Sie Erfolge in **park**-Lage!

Richtiger
Mehrwert für Sie!

Plus-Pluspunkte im Park

Erstklassiges Image
Innovatives Umfeld
Optimale
Verkehrsanbindung
Vielfältige Services
Gelebter Know-how-Transfer

- **Tagungsräume**
(für 10-200 Personen)
- **Mietflächen**
(für Büro und Labor)
- **Grundstücke**
(für Neubauten)

TechnologiePark Paderborn GmbH
Technologiepark 13 · 33100 Paderborn
Fon 0 52 51 / 1 60 90-10
Fax 0 52 51 / 1 60 90-49
Mail: info@technologiepark-paderborn.de

www.technologiepark-paderborn.de

Kooperationspartner der Universität Paderborn





Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Schäfer

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

„Paderborn ist Informatik“ – nicht zufällig wurde diese Initiative von der Universität in Kooperation mit der Wirtschaftsförderungsgesellschaft der Stadt sowie den lokalen IT-Unternehmen incony, s&n und TEAM letztes Jahr ins Leben gerufen. Nicht nur die Universität mit der Informatik als einem ihrer Profil bildenden Fächer, sondern auch die Stadt Paderborn mit mehr als 300 meist mittelständischen IT-Unternehmen sind von ihr geprägt. Viele 1 000 Arbeitsplätze sind inzwischen, nicht zuletzt durch Ausgründungen aus der Universität, in diesem Bereich entstanden. Das Erbe des Computerpioniers Heinz Nixdorf, das sich darüber hinaus auch in dem weltweit größten Computermuseum an der Fürstenallee widerspiegelt, ist unverkennbar.

Nicht zufällig steht aber auch die Ausgabe dieses ForschungsForums unter dem weit gefassten Thema Informatik und ihre vielschichtigen Anwendungen. Die Bedeutung der Informatik für unser gesamtes gesellschaftliches und wirtschaftliches Leben kommt darin zum Ausdruck, dass das Bundesministerium für Forschung und Technologie das Jahr 2006 zum Wissenschaftsjahr der Informatik erklärt hat, nachdem 2005 als Einsteinjahr die Physik hervorgehoben worden war und 2007 das Jahr der Geisteswissenschaften sein wird. In ganz Deutschland sind 2006 vor allem populärwissenschaftliche Veranstaltungen durchgeführt worden, um die Rolle der Informatik und die von ihr produzierten Ergebnisse zu veranschaulichen und noch mehr in das Bewusstsein der Bevölkerung zu rücken. In Paderborn wurden diese Veranstaltungen zum großen Teil federführend durch die oben erwähnte Initiative organisiert.

Insbesondere die Verbindung von Informatik und ihrer Schwesterdisziplin Mathematik mit ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen produziert die heute auf dem Weltmarkt erfolgreichen Produkte, die Deutschland auch im letzten Jahr wieder zum „Exportweltmeister“ gemacht haben. Voraussetzung für die Behauptung dieser Position ist gelebte Interdisziplinarität in der Forschung zwischen den beteiligten Fächern, wie sie gerade an unserer Universität selbstverständlich geworden ist und durch die Beispiele in diesem Heft unterstrichen wird. Aber nicht nur die gemeinsame Forschung von Informatik und Ingenieurwissenschaften, wie sie an dieser Universität zum Beispiel in zwei Sonderforschungsbereichen tagtäglich passiert, gibt wesentliche Impulse für die Produkte von morgen, sondern weit darüber hinaus sind enge Verflechtungen zwischen Informatik und den Naturwissenschaften und auch den Geisteswissenschaften eine Basis sogar für einschneidende gesamtgesellschaftliche Entwicklungen.

Nicht zufällig erreichte die Universität in diesen Tagen deshalb eine weitere sehr positive Nachricht, die ihre Exzellenz in der Informatik und ihren Anwendungen in den Ingenieurwissenschaften unterstreicht. Im Rahmen der hier mehrfach dargestellten Exzellenzinitiative wurde der Vorantrag der Universität im Bereich der Informationstechnologie mit 39 weiteren Bewerbern aus ca. 150 Anträgen ausgewählt und die Universität zu einem so genannten Vollantrag aufgefordert. Die endgültige Entscheidung, die im Oktober 2007 fällt, würde eine Forschungsförderung von etwa 32 Millionen Euro bedeuten.

Natürlich unterstreichen Beiträge dieser Ausgabe auch eindrucksvoll, dass nicht nur im Umfeld der Informatik aktiv geforscht wird. Stellvertretend für viele weitere Aktivitäten sei hier die maßgebliche Beteiligung der Universität an der Canossa Ausstellung genannt. Allein die Thematik des Wissenschaftsjahres 2006 hat diese Ausgabe angeregt. Die Redaktion wird sich bemühen, auch in Zukunft auf das dann verkündete Thema des Wissenschaftsjahres verstärkt Bezug zu nehmen.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen viel Spaß und vielleicht interessante neue Ein- und Ansichten beim Lesen dieser Ausgabe

Wilhelm Schäfer

Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs

Neue Hoffnung für Herzranke

Volumenrendering für die Gesundheit

Prof. Dr. med. Wolfgang Burchert, Prof. Dr. techn. Gitta Domik, Dr. med. Eva Fricke,
Dr. rer. biol. hum. Harald Fricke, Dipl.-Inform. Frank Götz, Dipl.-Ing. Reiner Weise

Allein in Deutschland sterben jährlich über 340 000 Menschen an den Folgen der koronaren Herzkrankheit. Somit zählt sie in den Industrienationen mittlerweile zu den häufigsten Todesursachen. Als koronare Herzerkrankung, eine so genannte Zivilisationskrankheit, wird die Verengung oder der Verschluss der Herzkranzgefäße (Koronararterien) bezeichnet. Dabei wird das Herz nur noch mangelhaft durchblutet. Die derzeit geläufigste Untersuchungsform ist die Koronarangiographie, eine zweidimensionale Darstellung von Blutgefäßen mittels Röntgenstrahlen, bei der die Herzkranzgefäße sichtbar gemacht werden. Durch diese Untersuchungsmethode ist eine Diagnose der morphologischen Verhältnisse der Herzkranzgefäße möglich. Weiterhin können Stenosen, d. h. die Verengung von Blutgefäßen, lokalisiert sowie deren Art und Ausmaß bestimmt werden.

Bei der Koronarangiographie wird ein dünner Katheter in eine Arterie (Schlagader) eingeführt. Der komplikationsärmste verwendete arterielle Zugang befindet sich in der rechten oder linken Leiste. Die so genannten Herzkatheter sind Kunststoffschläuche, die unter Röntgendurchleuchtung zu den Abgängen der Herzkranzgefäße aus der Aorta (Körperschlagader) bewegt

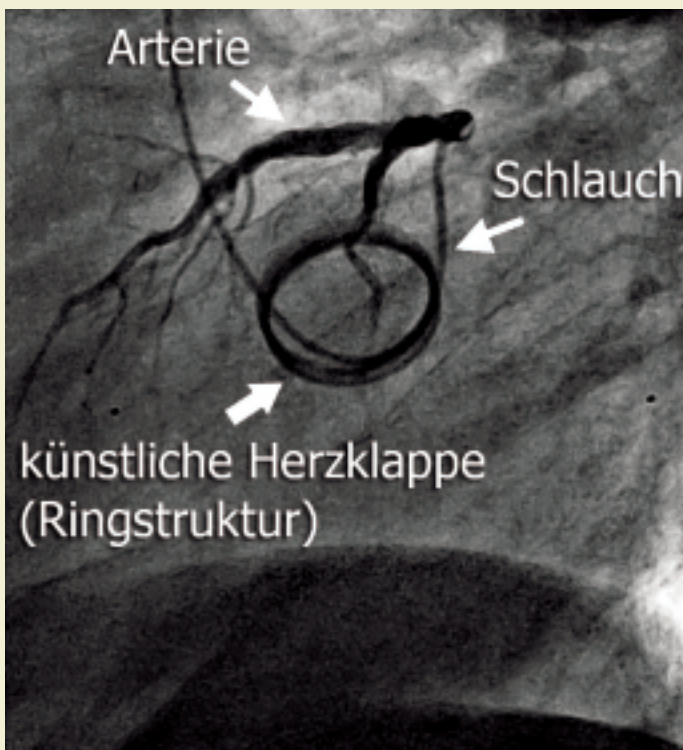


Abb. 1: Koronararterien werden durch die Verwendung eines Herzkatheters mit Röntgenkontrastmittel (Kunststoffschlauch) gefüllt.



Prof. Dr. techn. Gitta Domik ist Professorin für Computergrafik, Visualisierung und Bildverarbeitung am Institut für Informatik der Universität Paderborn.

werden (Abbildung 1). Über diese Katheter werden die Herzkranzgefäße mit Röntgenkontrastmittel gefüllt. Durch gleichzeitige Röntgendurchleuchtung können dann Veränderungen an den Herzkranzgefäßen sichtbar gemacht werden. Nach einer solchen Untersuchung wird entschieden, welches Vorgehen im Weiteren sinnvoll ist. Während bei einem Normalbefund keine weitere

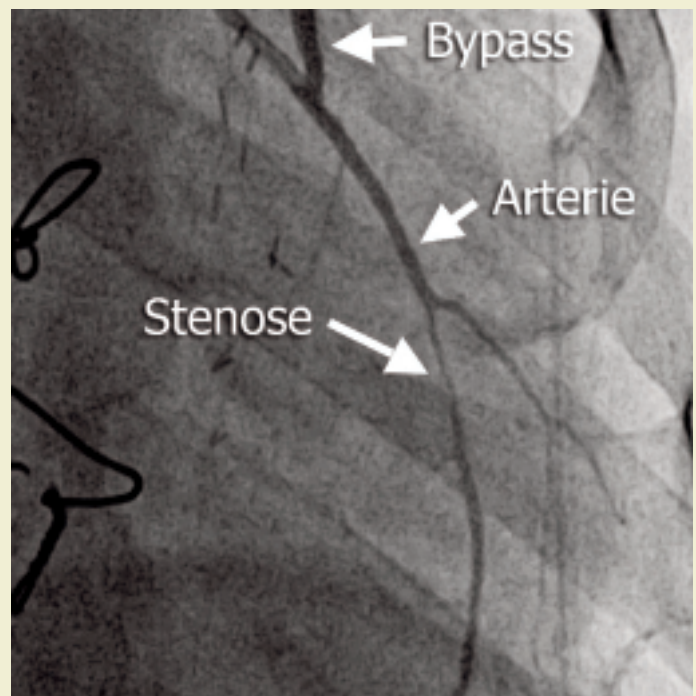


Abb. 2: Darstellung einer Arterie mit Engstelle (Stenose) und Bypass bei der Koronarangiographie. Eine Weitung der Stenose mit Hilfe eines Ballonkatheters (PTCA) ist dann sinnvoll, wenn der Herzmuskel, der von diesem Gefäß versorgt wird, eine Durchblutungsstörung aufweist.



Abb. 3: System zur automatisierten Injektion des Radiopharmakons während der PET-Aufnahme im Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen.

Behandlung notwendig ist, sind bei Verengungen oder Veränderungen an den Herzkranzgefäßen je nach Ausprägung folgende Maßnahmen sinnvoll:

- Ein medikamentöses Vorgehen, welches meist bei nur gering oder mäßig ausgeprägten Verengungen an den Herzkranzgefäßen gewählt wird. Dieses dient der Vorbeugung, um eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes zu vermeiden. Dies kann unter Umständen die dauerhafte Einnahme von Medikamenten einschließen.
- Aufweitung des verengten Gefäßes mit Hilfe eines Ballonkatheters (Ballonangioplastie) und/oder die Implantierung eines kleinen Gittergerüsts in Röhrenform aus Metall oder Kunststoff (Stentimplantation).
- Operative Verbesserung der Durchblutung am Herzen durch Anlage so genannter Bypässe. Mit einem Bypass wird eine Verengung oder der Verschluss eines Herzkranzgefäßes überbrückt. Dabei wird die verengte Stelle (Stenose) überbrückt, indem entweder eine Verbindung zwischen Hauptschlagader (Aorta) und Herzkranzgefäß hinter der Verengung angelegt wird (meist unter Verwendung einer Vene aus dem Bein) oder ein Blutgefäß der Brustwand zum Herzkranzgefäß „umgeleitet“ wird (arterieller Bypass) (Abbildung 2).

Problematisch ist bei dieser Art der Untersuchung sicherlich, dass bereits für die Diagnose ein Eingriff notwendig ist. Im Folgenden wird nun beschrieben, inwieweit es heutzutage bereits möglich ist, durch die Verwendung aktueller Aufnahmetechniken in Verbindung mit modernen Darstellungsverfahren eine Diagnostik ohne Eingriff durchzuführen, die eine dreidimensionale Darstellung der Herzkranzgefäße ermöglicht und zusätzlich eine Beurteilung des Herzmuskels bezüglich seiner Durchblutung und Vitalität erlaubt.

Untersuchung mittels PET/CT

Im Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen in Bad Oeynhausen wird zur Diagnostik der koronaren Herzerkrankung eine Kombination aus Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und Computertomographie (CT) als Aufnahmeverfahren verwendet. Eine PET-Aufnahme stellt die Verteilung einer radio-

aktiv markierten Substanz (Radiopharmakon) im Organismus dar (Abbildung 3). Hierbei werden vor allem biochemische und physiologische Vorgänge abgebildet. Dieses wird als „funktionelle Bildgebung“ bezeichnet und dient in der Kardiologie (zuständig für Herz-Kreislauf-Erkrankungen) unter anderem zum Nachweis schwach durchbluteter Bereiche innerhalb des Herzmuskels (Abbildung 4). Bei der CT handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren. Dabei werden Röntgenstrahlen, die durch den Körper geschickt werden, von mehreren Detektoren gleichzeitig aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität gibt Aufschluss über die Abschwächung der Strahlung. Die CT eignet sich besonders gut für eine Aufnahme des menschlichen Gewebes und der Knochen.

Beide Aufnahmeverfahren liefern als Ergebnis eine Menge von Schnittbildern des menschlichen Körpers bzw. eines Teilbereiches (z. B. Oberkörper). Mittels dieser zweidimensionalen Schnittbilder ist es nun möglich, zwei dreidimensionale Volumi-

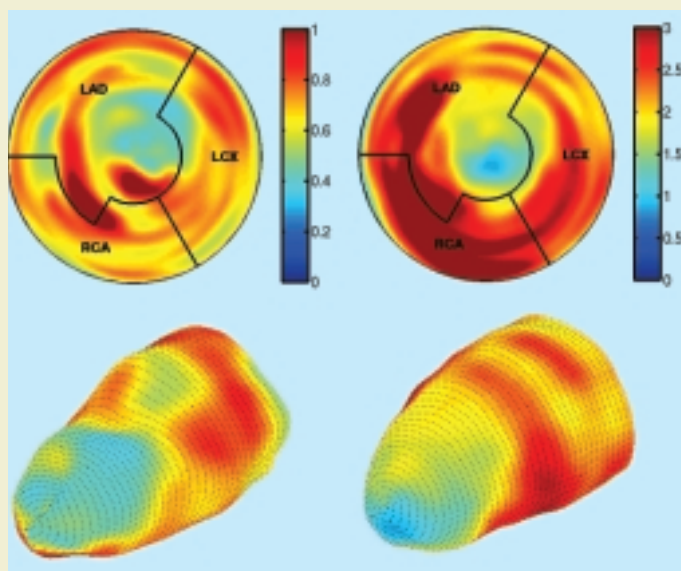


Abb. 4: Visualisierung der quantitativen Flussinformation bei einer Ruheuntersuchung (links) und Belastungsuntersuchung (rechts) in $\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{min})$. Rot kennzeichnet stark und blau schwach durchblutete Bereiche. Im oberen Bild ist jeweils eine ebene Projektion („Polar Map“) und im unteren Bild die dazugehörige rückprojizierte dreidimensionale Darstellung der linken Herzkammer zu sehen.

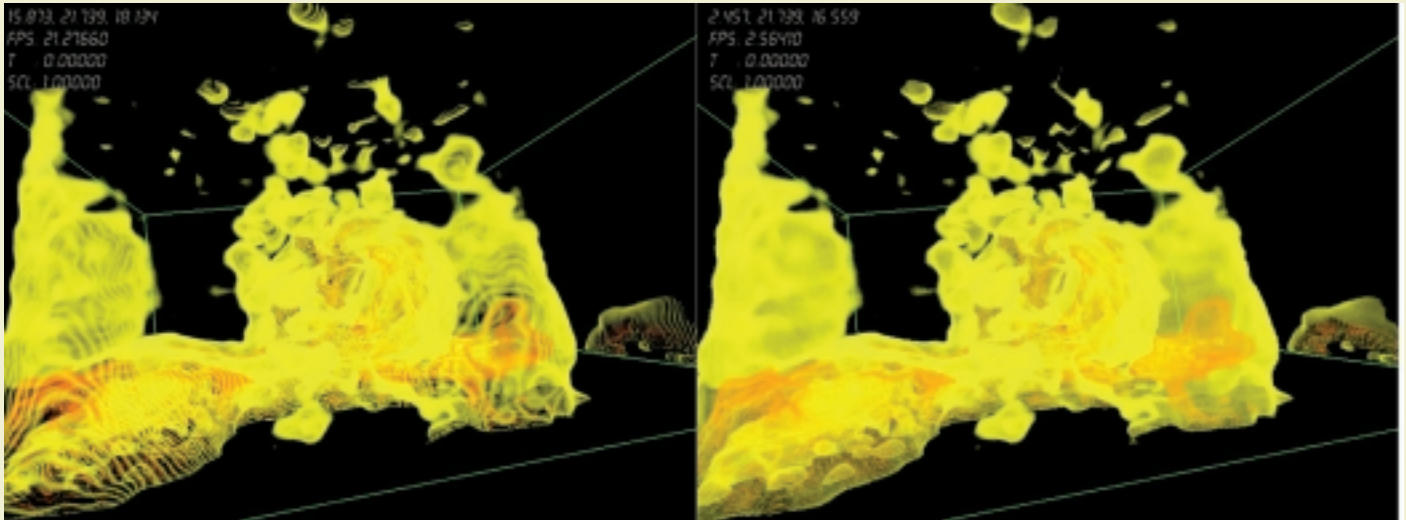


Abb. 5: Das Volumenrendering wird direkt auf der Grafikhardware mittels Texture-Slicing (links) oder Ray-Casting (rechts) in Echtzeit berechnet. Beim Texture-Slicing sind deutlich Schnittebenen entlang der Sichtachse zu erkennen. Diese verschwinden beim rechenintensiveren Ray-Casting.

na des Körpers wiederherzustellen (rekonstruieren). Da hier zwei verschiedene Aufnahmeverfahren Verwendung finden, muss nach der Rekonstruktion zuerst eine Koregistrierung der beiden aus CT- und PET-Schnittbildern rekonstruierten Volumina stattfinden. Bei der Koregistrierung werden die Volumina so ausgerichtet, dass sich gleiche Bereiche des Körpers (z. B. einzelne Organe) genau überdecken. So kann ausgehend von der CT-Aufnahme unmittelbar der dazugehörige Bereich in der PET-Aufnahme betrachtet werden.

Volumenrendering

In dem Projekt mit dem Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen beschäftigt sich die Fachgruppe „Computergrafik, Visualisierung und Bildverarbeitung“ der Universität Paderborn mit der dreidimensionalen Darstellung kombinierter Volumina. Dabei soll auch die gleichzeitige Darstellung von mehr als zwei Volumina (z. B. unter Verwendung unterschiedlicher Radiopharmaka bei der PET-Aufnahme) möglich sein. Auch ist eine

Darstellung zeitdynamischer Aufnahmen denkbar, d. h. es werden bereits bei der PET- bzw. CT-Aufnahme mehrere Volumina hintereinander aufgenommen, die nachher in Form einer Animation angezeigt werden können. Weiterhin soll den diagnostizierenden Ärzten die Möglichkeit geboten werden, mit solchen (sehr komplexen) Daten interaktiv an handelsüblichen Computern Diagnosen zu erstellen.

Im Laufe des Projektes wurden zwei direkte Volumenrendering-Verfahren unter Verwendung moderner Grafikhardware zur Darstellung regulärer kubischer Volumendaten umgesetzt. Beide Verfahren berechnen die gleiche Darstellung und unterscheiden sich nur in ihrer Darstellungsqualität und Geschwindigkeit, wobei beide Verfahren interaktiv nutzbar sind (Abbildung 5). Die einzelnen Datensätze können hierbei verschiedene Dimensionen aufweisen und lassen sich nachträglich positionieren, rotieren und skalieren, um eventuelle Fehler bei der Koregistrierung nachträglich zu korrigieren. Mittels einer datensatzspezifischen Transferfunktion können einzelne Bereiche differenziert

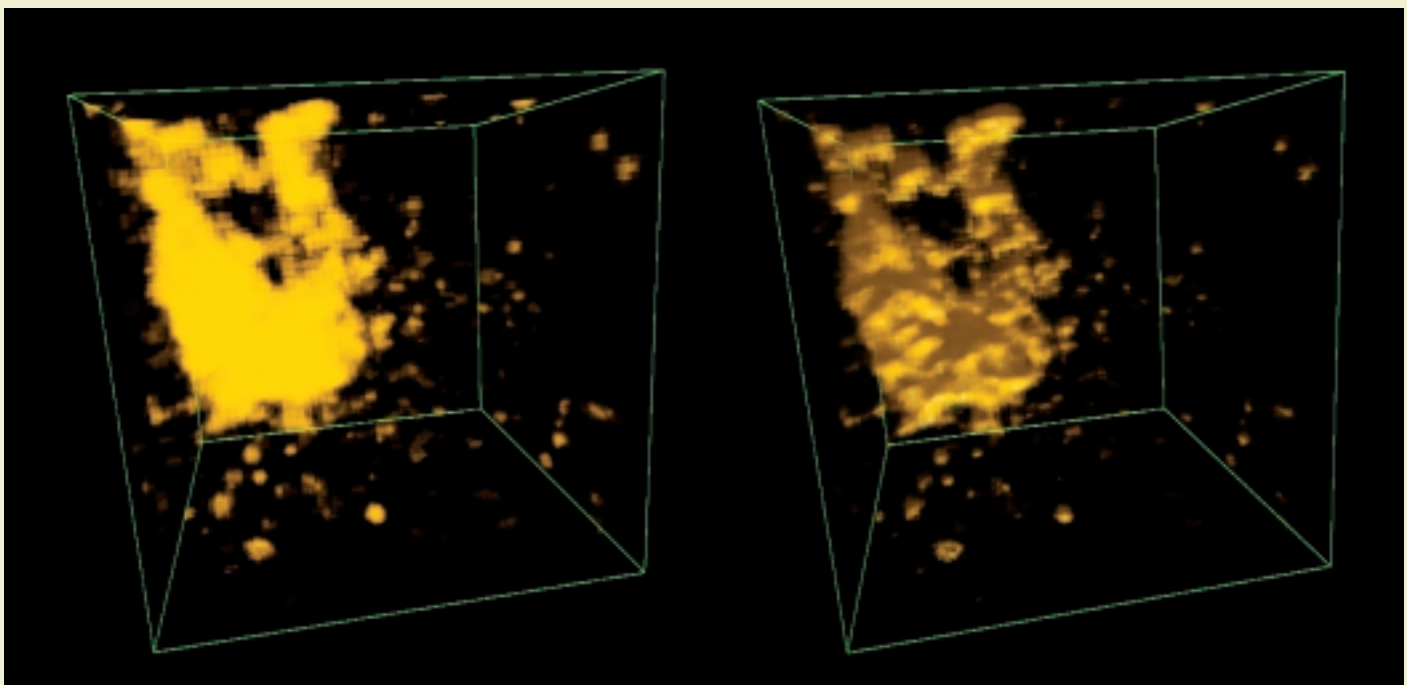


Abb. 6: Unschattierte (links) und schattierte Darstellung (rechts) des Blutflusses in der rechten Herzkammer. Bei der Verwendung von Schattierung ist der Tiefeneindruck sichtbar besser.

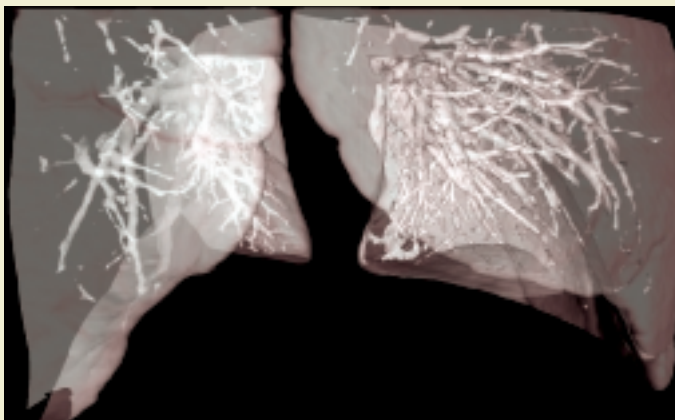


Abb. 7: Extraktion der Lungenflügel und Lungengefäße aus der CT-Aufnahme.



Abb. 8: Segmentierung von Hauptästen der Herzkranzgefäße aus der CT-Aufnahme (ausgehend von der Aorta).

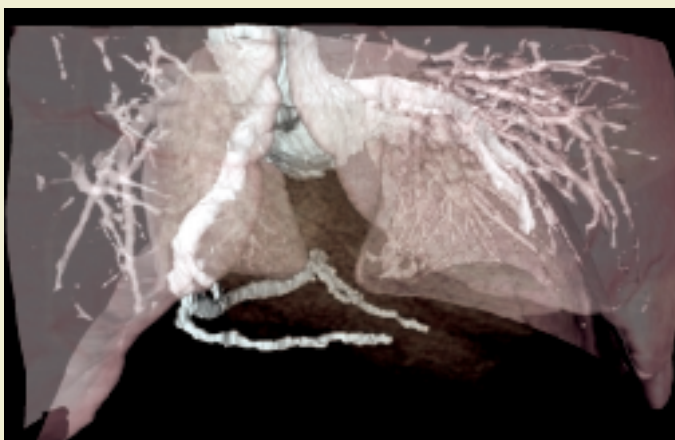


Abb. 9: Fusion von Lungenflügeln mit Lungengefäßen, Herz und Herzkranzgefäßen.

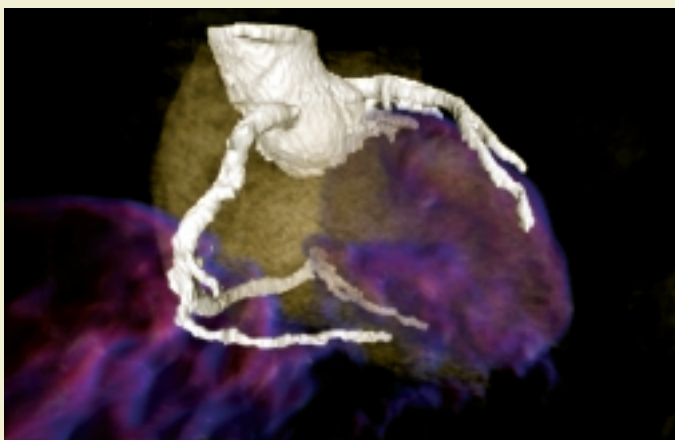


Abb. 10: Die in Grau und Braun dargestellten Informationen (Herz und Herzkranzgefäße) stammen aus der CT-Aufnahme, die violett eingefärbten Volumendaten (Flussinformationen der Leber und linken Herzkammer) wurden mittels PET aufgenommen.

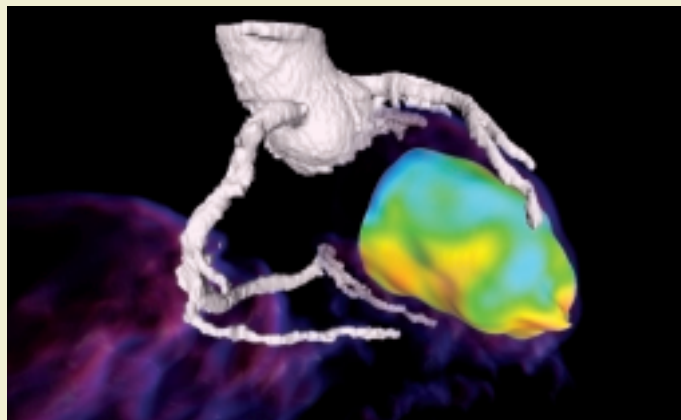


Abb. 11: Darstellung der quantitativen Flussinformation aus der PET-Aufnahme kombiniert mit der Überlagerung des segmentierten Koronarbaums aus der CT-Aufnahme. Die Herzkranzgefäße weisen keine relevanten Stenosen auf und auch die quantitativen Flussinformationen liegen im Normalbereich. Somit ist keine weitere Behandlung dieses Patienten notwendig.

eingefärbt bzw. durch die Verwendung von Transparenzen unterschiedlich stark ausgeblendet werden.

Eine kombinierte Anzeige aus zuvor aufgenommenen zeitdynamischen CT- und PET-Aufnahmen kann interaktiv, d. h. mit einer Bildwiederholungsrate von im Durchschnitt 15 Bildern pro Sekunde, dargestellt werden. Des Weiteren ist es möglich, einzelne Transferfunktionen, welche die Selektion der gesamten Messdaten auf einen kleinen, relevanten Bereich einschränken und mit denen die Darstellung der einzelnen Volumendaten verändert werden kann, zeitnah (wiederum interaktiv) anzupassen. Durch eine Schattierungsberechnung (Abbildung 6) und lineare Interpolation zwischen den vorhandenen Zeitschritten kann die Qualität der Darstellung zusätzlich verbessert werden. Unter Verwendung einer zeitdynamischen Darstellung kann unter anderem der Blutfluss einer PET-Aufnahme in Echtzeit animiert, interpoliert und direkt manipulierbar dargestellt werden.

Fusionierte Darstellung von PET/CT

Wie bereits zuvor erwähnt, ist es möglich, durch die Kombination von PET und CT die Daten der beiden Aufnahmeverfahren zu fusionieren. Dafür lassen sich aus dem Volumen der CT-Aufnahme eines menschlichen Oberkörpers leicht die Lungenflügel mit ihren Lungengefäßen (Abbildung 7) und das Herz extrahieren. Diese dienen in der späteren Darstellung lediglich zur Orientierung im Körper und werden für die eigentliche Diagnose nicht benötigt. Mittels einer Segmentierung können zusätzlich die Herzkranzgefäße ausgeschnitten werden (Abbildung 8). Eine Fusion dieser beiden Darstellungen bietet eine gute Einsicht in den für die Diagnose interessanten Teil der Organe des menschlichen Brustbereichs (Abbildung 9).

Durch die im Vorfeld bereits vorgenommene Koregistrierung der Volumina aus PET- und CT-Aufnahme ist eine kombinierte Darstellung direkt möglich (Abbildung 10). Eine Darstellung der Koronargefäße in Kombination mit der dreidimensionalen Darstellung der quantitativen Flussinformation der Wand der linken Herzkammer erleichtert die Beurteilung von Stenosen, da die funktionelle Auswirkung der Engstelle auf die Durchblutung des Herzmuskels dargestellt wird. Der Patient ist während der Untersuchung lediglich einer geringen Strahlenexposition ausgesetzt.

Fazit

Die hier vorgestellte Software erlaubt dem diagnostizierenden Arzt eine direkte Navigation in der multidimensionalen Volumendarstellung. Die Qualität der Darstellung ist hierbei sehr hoch und ermöglicht durch die zeitnahe Veränderung der Transferfunktion eine schnelle bzw. direkte Einsicht in die Daten und bietet dadurch ein effizientes Arbeiten mit ausdrucksstarken Informationen. Durch die Verwendung von dreidimensionalen Darstellungsverfahren ist, im Vergleich zu zweidimensionalen Repräsentationen, eine realitätsnahe und unmittelbare Untersuchung der zuvor aufgenommenen Volumendaten möglich. Hierdurch sind zukünftig neue Möglichkeiten bei der Diagnose, nicht nur im kardiologischen Umfeld, denkbar.



Dipl.-Inform. Frank Götz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe „Computergrafik, Visualisierung und Bildverarbeitung“. Er forscht auf dem Gebiet „Interaktive Visualisierung zeitvarianter und mehrdimensionaler Daten durch den Einsatz von Grafikhardware“.



Prof. Dr. med. Wolfgang Burchert ist Direktor des Instituts für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung am Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen und Professor an der Ruhr-Universität Bochum.



Dr. med. Eva Fricke ist Fachärztin für Nuklearmedizin und Funktionsoberärztin für den Arbeitsbereich Positronenemissionstomographie im Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung am Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen.



Dr. rer. biol. hum. Harald Fricke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung am Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen. Sein Spezialgebiet sind die methodischen Aspekte der Positronenemissionstomographie.



Dipl.-Ing. Reiner Weise ist Medizintechniker und arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Radiologie, Nuklearmedizin und Molekulare Bildgebung am Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen.

Kontakt: Prof. Dr. techn. Gitta Domik

Tel.: 05251/60 5388

E-Mail: domik@uni-paderborn.de

Einsteigen.



**In unserem technisch-orientierten Unternehmen
bieten wir laufend interessante Herausforderungen für
Absolventen*¹⁾ und Berufserfahrene**

der Fachbereiche E-Technik, Informatik, Maschinenbau, Mechatronik ...

Ein hohes und stetiges Umsatzwachstum, über 600 Mitarbeiter, mehr als 12.000 weltweite Installationen: Das ist die Bilanz der Firma dSPACE, dem seit mehr als 15 Jahren global führenden Anbieter von Werkzeugen für die Entwicklung und den Test mechatronischer Regelungssysteme. Schwerpunkte sind regelungstechnisches Prototyping auf der Basis von MATLAB® und Simulink®, Code-Generierung, Echtzeitsimulation und Applikation. Ob Antriebsstrang, Karosserie oder Fahrdynamik: Überall ermöglichen und verbessern dSPACE-Produkte die Entwicklungsprozesse unserer Kunden.

- **Produktmanagement**
- **Hardware-Entwicklung**
- **Software-Entwicklung (GUI, embedded systems)**
- **Anwendungen Echtzeitsimulation**
- **Technische Dokumentation, Marketing und Vertrieb**

*¹⁾ wir kennen den Unterschied zwischen Männern und Frauen, aber wir machen keinen.

Schauen Sie sich doch mal unsere aktuellen Stellenangebote an unter:
www.dspace.de/jobs.htm



dSPACE GmbH · Personalabteilung
Herrn Harald Wilde
Technologiepark 25 · 33100 Paderborn
Tel.: +49 5251 1638-0 · Fax: +49 5251 66529
www.dspace.com



Das „Canossa“-Zeitalter

Zwischen historischer Wirklichkeit und Geschichtskonstruktion

Prof. Dr. phil. Frank Göttmann, Prof. Dr. phil. Dietmar Klenke,
Prof. Dr. phil. Jörg Jarnut, Prof. Dr. phil. Stephan Müller

Die Paderborner „Canossa“-Ausstellung, die im letzten Jahr überregional auf großen Zuspruch traf, konnte sich auf ein gleichnamiges universitäres Forschungsprojekt stützen. Es ging dabei zum einen um die mittelalterlichen Machtkämpfe zwischen Papst- und Königtum und zum anderen um die geschichtspolitische Instrumentalisierung dieser Auseinandersetzungen in der Neuzeit. Unter Beteiligung des „Instituts zur Interdisziplinären Erforschung des Mittelalters und seines Nachwirkens“ (IEMAN) hatte das aus Historikern und Germanisten bestehende Forscherteam die reizvolle Aufgabe, wissenschaftliche Grundlagen für ein Ausstellungsvorhaben erarbeiten zu helfen, das zu neuen Ufern aufbrach. Das herausragende Merkmal bestand in der doppelten Spiegelung des „Canossa“-Ereignisses von 1077: Zum einen aus dem Blickwinkel der heutigen Mittelalterforschung und zum anderen aus der Warte eines sich über Jahrhunderte wandelnden Blicks auf „Canossa“, dem sich die Neuzeit-Historiker der Forschergruppe zuwandten. Indem beide Perspektiven Berücksichtigung fanden, trat die Spannung zwischen heutiger Forschung und zeitgebundenen



Prof. Dr. phil. Frank Göttmann hat den Lehrstuhl für Geschichte der Frühen Neuzeit inne. Die Schwerpunkte seiner Lehr- und Forschungstätigkeit liegen auf der spätmittelalterlichen und frühneuzeitlichen Sozial-, Wirtschafts- und Bevölkerungsgeschichte und der Geschichte des Alten Reiches. Aktuell ist er an einem größeren Forschungsprojekt zur Geschichte des frühmodernen Geistlichen Staates und an der Erarbeitung eines „Historischen Handbuchs der jüdischen Gemeinschaften in Westfalen“ beteiligt.



Prof. Dr. phil. Dietmar Klenke lehrt am Historischen Institut Neuere Geschichte und Didaktik der Geschichte. Zu seinen Arbeitsgebieten zählten Nationalismus-, Liberalismus- und Konfessionalismusforschung, obendrein Vereinsforschung und Mediengeschichte sowie Musik als Medium der politischen Kommunikation. Zurzeit befasst er sich mit der Geschichte des Klischeebildes vom „schwarzen Paderborn“ im Vergleich mit der Klischeegeschichte des „schwarzen Münster“.



Abb. 1: Heinrich IV. kniet vor Markgräfin Mathilde und bittet um Vermittlung, links Abt Hugo von Cluny („Vita Mathildis“ aus dem 12. Jahrhundert).

Geschichtsbildern früherer Jahre und Jahrhunderte grell in Erscheinung. Um die Zeit- und Interessengebundenheit geschichtlicher Erinnerung zu veranschaulichen, bot sich das Sprachbild „Canossa“ geradezu an. Denn es verweist auf ein epochenübergreifendes Kernelement europäischer Identität: auf das konfliktträchtige und stets von Neuem auszubalancierende Verhältnis von politischer Herrschaft und religiösen Deutungsmächten. Hier stoßen wir auf die Wurzeln der modernen Gewaltenteilung als Garant der Freiheitssicherung.

I. Die Mittelalter-Forschung zum „Investiturstreit“

Wie kaum ein zweites mittelalterliches Phänomen hat der so genannte Investiturstreit seit dem 19. Jahrhundert das Interesse der deutschen Geschichtsforscher auf sich gezogen. Er umschreibt den epochalen Konflikt zwischen Königtum und Papsttum im 11. und 12. Jahrhundert. Der Streit entzündete sich



Abb. 2: Antiker Marmorsessel, „Papstthron“, Giovanni in Laterano.

an der bis dahin nahezu uneingeschränkten Verfügungsgewalt des Königs über die Kirche, vor allem hinsichtlich der Einsetzung von Bischöfen und Reichsäbten. Nach und nach erfasste diese Auseinandersetzung alle Bereiche der mittelalterlichen Gesellschaft. Tief greifende Gegensätze und Umbrüche kennzeichneten diese Epoche, aber auch bedeutende Reformen und Neuansätze, vor allem im Verhältnis von königlicher (regnum) und priesterlicher (sacerdotium) Gewalt. Zum Sinnbild dieser Epoche wurde später in plakativer Überzeichnung der Bußgang Heinrichs IV. nach „Canossa“. Dieses Ereignis vom Januar 1077 geriet zum „geschichtsklitternden“ Sprachbild, während das Ereignis selbst kaum die ihm später zugesprochene Bedeutsamkeit besaß. Für die Zeitgenossen war vielmehr die Absetzung Gregors VII. als Papst und der darauf folgende Kirchenbann des Königs entscheidend.

Vielgestaltige Interessenkonflikte hinter dem Papst-König-Machtkampf

Mit dem heutigen Forschungsstand setzten sich in der Vorbereitungsphase der „Canossa“-Ausstellung zwei vom Mittelalter-Institut der Universität veranstaltete Tagungen auseinander. Man war sich darin einig, dass die ältere Sicht, die den Konflikt auf die machtpolitischen Pole König und Papst zugespitzt hatte, ein zu vereinfachtes Bild vom Geschehen gezeichnet hat. In Wirklichkeit stellte sich der Machtkampf als ein nur schwer überschaubares Gewirr von sich kreuzenden Konfliktperspektiven dar, hinter denen jeweils die Eigeninteressen unterschiedlicher Akteure standen, die den Machtkampf für sich instrumentalisierten. Ins Blickfeld gerieten zum einen die mächtige Markgräfin von Tuszien, die Hausherrin der Canossa-Burg, und der Abt des



Abb. 3: Thron Kaiser Heinrichs IV. in Goslar (11. Jahrhundert).

Reformklosters Cluny und zum anderen eine Reihe ehrgeiziger Bischöfe und Reichsfürsten, die wiederholt die Fronten wechselten (Abbildung 1). Das Ringen um die „rechte Ordnung der Welt“ kannte viele Beteiligte, was erst die jüngere Forschung deutlich herausgestellt hat. Aus diesem Grunde lässt sich die Bedeutung des „Canossa“-Gangs für das Verhältnis von Papsttum und Königtum kaum in das Korsett vereinfachender Begriffspaare wie „Sieg und Niederlage“ pressen. Vielmehr handelte es sich um ein hochkompliziertes machtpolitisches Spiel, bei dem der König zwar kurzfristig gewann, weil er nach den mittelalterlichen Bußregeln den Papst nötigte, ihn von seinem Bann zu lösen; aber auf längere Sicht gab das Bußritual dem Vorranganspruch des Papsttums Auftrieb. Inwieweit dies dauerhaft zur Schwächung des deutschen Königtums beitrug, muss offen bleiben, weil es nach wie vor an internationalen Vergleichsstudien mangelt.

Plädoyer gegen nationaldeutsche Blickverengungen

Bei der Abschätzung der Folgen von „Canossa“ gaben vor allem die ausländischen Tagungsreferenten zu bedenken, dass die auf den Machtkampf zwischen Papst- und Königtum fixierte Debatte eine „deutsche“ Blickverengung verrate. Sie betonten, dass die große Vielfalt von Interessenperspektiven deutlicher herauszustreichen sei. Mit Blick darauf wurde die für die Ausstellungskonzeption grundlegende Einsicht formuliert, dass das traditionell deutsche Geschichtsbild seine Wurzeln im Kulturkampf des 19. Jahrhunderts habe, wo man den mittelalterlichen Machtkampf zwischen Papst und Kaiser in erster Linie als Kampf um die Schaffung einer stabilen deutschen Zentralgewalt gedeutet habe

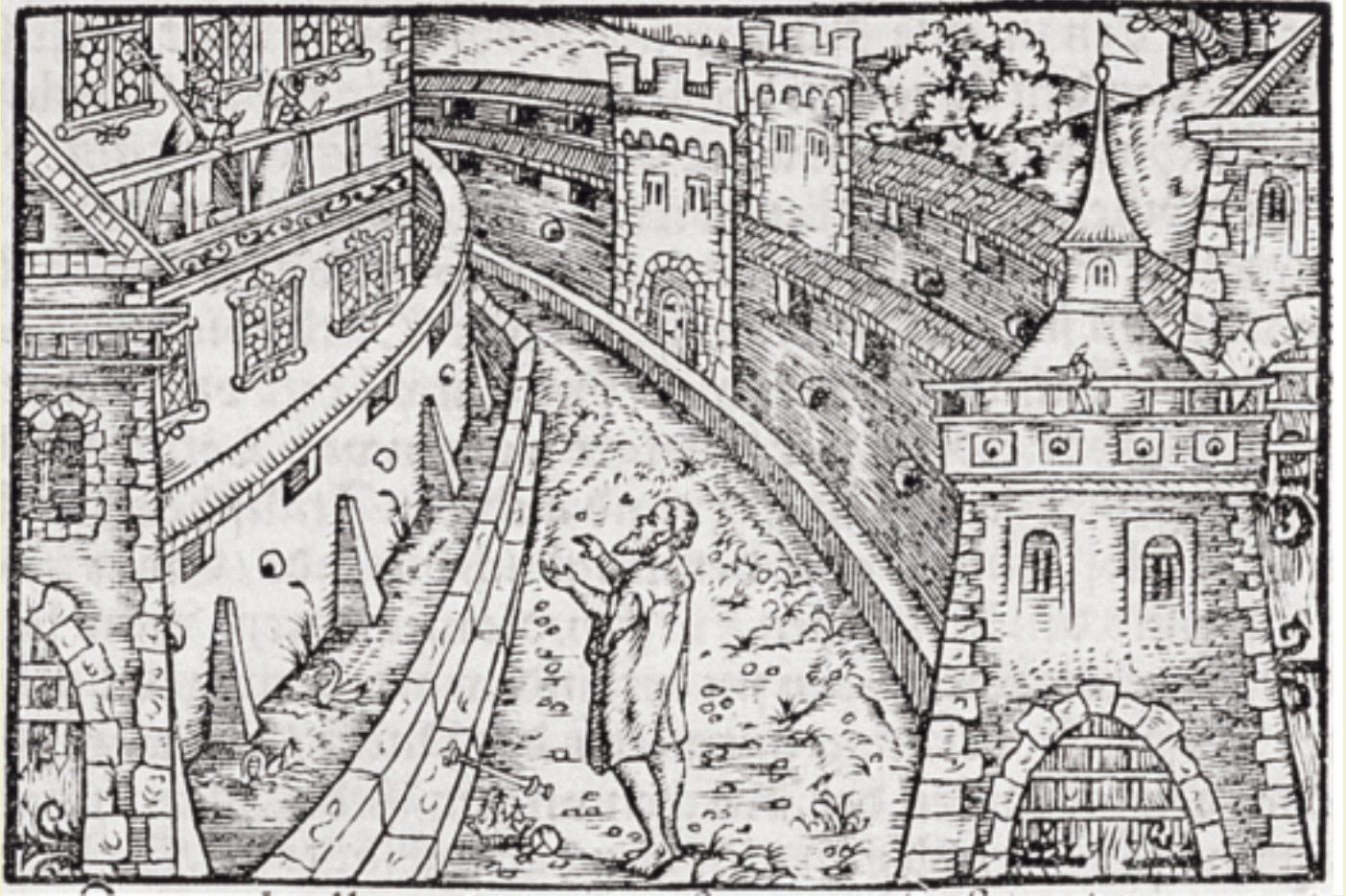


Abb. 4: Holzschnitt vom „Canossa“-Bußgang aus einer protestantischen Biographie über Heinrich IV. aus dem 16. Jahrhundert (Joh. Stumpf).

(Abbildung 2 und 3). Demnach scheint die Sehnsucht der deutschen Nationalbewegung nach einem machtvollen Nationalstaat der Perspektivenlieferant für die Mittelalter-Geschichtsschreibung gewesen zu sein. Ein auf den preußisch-deutschen Aufstieg fixierter Blick wurde erst in jüngerer Zeit überwunden, ebenso die nationaldeutschen Scheuklappen.

Da zuspitzende Vereinfachungen erfreulicherweise ausgedient haben, konnten die Vorbereitungstagen jenseits von Schwarz-Weiß-Malerei ein fast schwindelerregend kompliziertes Bild von den Auseinandersetzungen der „Canossa“-Zeit zeichnen. Zu den Erkenntnisfortschritten der jüngsten Zeit zählt, dass neuerdings auch die umfängliche Streitschriften-Literatur des Investiturstreites systematisch untersucht wird und erstmals die kommunikative Infrastruktur dieses Zeitalters klarer in Erscheinung tritt. Damit lassen sich erstmals die Träger und Adressaten der politischen Propaganda mit größerer Trennschärfe benennen und damit auch das breite Spektrum der Konfliktparteien. Für ein historisch-politisches Ausstellungsvorhaben wie das Paderborner „Canossa“-Projekt war diese Einsicht von eminenter Bedeutung, weil auf diese Weise ein anschauliches Bild vom kommunikativen Unterbau politischer Konflikte gezeichnet werden konnte, – eine Herausforderung, weil unsere modernen Vorstellungen von Verkehrs- und Kommunikationswegen auf die „Reiterkultur“ der „Canossa“-Zeit nicht anzuwenden sind.

Neue Einsichten aus der Perspektive deutschsprachiger Quellen

Von größtem Interesse ist, dass die Sprachwissenschaftler der universitären Forschergruppe erstmals auch mittelhochdeutsche

Zeitzugnisse systematisch ausgewertet haben. Mit Blick auf das vorherrschend lateinische Schriftgut haben deutschsprachige Quellen lange Zeit als Außenseitergattung gegolten, deren Bedeutung lange Zeit Rätsel aufgegeben hat. Nunmehr gibt eine Vielzahl von deutschsprachigen Zauber- und Segenssprüchen, Gebetsbüchern und Reiseberichten den Blick auf neue zeitgenössische Perspektiven frei, wenn sich beispielsweise ein Geistlicher in einem mittelhochdeutschen Gedicht über seine Vertreibung beklagt, die im Zusammenhang damit stand, dass der Investiturstreit auch mit der „Geißel“ kriegerischer Auseinandersetzungen behaftet war. Dass vorneweg prominente Reichsbischöfe diese Art Literatur gefördert haben, verspricht neue Einblicke in das Konfliktgeschehen.

II. „Canossa“ in der Frühen

Neuzeit – Konfessionalismus und Aufklärung

In der Frühen Neuzeit wirkten die Ereignisse von „Canossa“ im Umfeld der Reformation und der Konfessionalisierung fort. „Canossa“ entwickelte sich in der künstlerischen, publizistischen und historiographischen Rezeption zu einem Begriff, der für die Papst-Kaiser-Polarität stand und eine Ikonographie mit dem barfuß vor der Burg stehenden König Heinrich ausbildete (Abbildung 4). Daran anknüpfend widmeten sich die Frühneuzeitler der Forschergruppe der Frage, welche historischen Prozesse dahinter verborgen lagen, dass die „Canossa“-Redewendung Bedeutungen annehmen konnte, die sich vom mittelalterlichen Ursprungsereignis lösten und schließlich zum modernen Sprachbild vom „Gang nach Canossa“ führten, das heute gemeinhin auf eine antipäpstliche Äußerung Bismarcks zurückgeführt wird.

Die frühneuzeitliche Tradierung lässt sich als Bindeglied zwischen Ursprungsereignis und modernem Sprachgebrauch begreifen. Bemerkenswert ist, dass die Hauptakteure des Machtkonflikts um den Vorrang der höchsten geistlichen oder weltlichen Gewalt aus dem ursprünglichen Geschehen, dem Streit zwischen König und Papst um die Bischofseinsetzung, herausgelöst wurden und sich unterschiedliche Geschichten um den „Canossa“-Gang zu ranken begannen. Man sah, dass es nicht die eine, die wahre Geschichte gab. In dieser relativierenden Perspektive spiegelte sich das abnehmende Auslegungsmonopol der kirchlichen und höfischen Eliten. Die Frage nach der Deutungshoheit der unterschiedlichen Geschichtsbilder drängte sich auf.

Ablösung der „Canossa“-Kontrahenten vom ursprünglichen Ereignis

In der Zeit zwischen 1450 und 1600 erwähnten Publizistik, Geschichtsschreibung und Kunst nur selten den Namen der italienischen Burg Canossa. Teilweise wurde der Bußgang Heinrichs IV. sogar nach Rom verlegt. Wenn von den Ereignissen von 1077 die Rede war, dann traten die Exponenten Heinrich IV., Papst Gregor VII. und Mathilde von Tuszien hauptsächlich als individualisierte Personen und Charaktere in Erscheinung, die entweder an die konkreten Geschehnisse rückgebunden oder aber in fiktionalen Geschichten eingebettet sein konnten. Stark personalisierte, nicht strukturbezogene Schilderungen bestimmen die Rezeption in dieser Zeit.

„Canossa“ als Kampfbegriff rivalisierender Konfessionen

Um 1500 schuf das neue Medium Buchdruck die Voraussetzungen für eine zunehmend bürgerliche Öffentlichkeit. Es wurden neue Quellen zur Geschichte der „Canossa“-Epoche erschlossen, und parallel dazu verfeinerte sich das quellenkritische Instrumentarium. Das führte nicht nur zu einer kritischen Hinterfragung der Überlieferung, sondern auch zu der Erkenntnis, historische Darstellungen und Deutungen für gegenwartsbezogene Zwecke instrumentalisieren zu können. In diesem Sinne nutzten die aufkommenden Konfessionen die Erinnerung an den „Canossa“-Gang. Die protestantische Deutung machte aus Kaiser Heinrich IV. einen Ahnherrn der Reformation, der die „deutsche Nation“ einigen und vor den Übergriffen der Kirchenfürsten als „Diener zweier Herren“ schützen wollte. Die Katholiken hingegen verwiesen auf die Bereitschaft des Papstes, die Irrenden und Abtrünnigen in Gnade zu rehabilitieren, ein Appell an die protestantischen Fürsten, dass ihnen der Weg zurück zum „wahren“ Glauben nicht versperrt sei.

Sämtlichen konfessionellen Interpretationen ist ein identitätsstiftendes Element zu eigen. So setzte die katholische Rezeption auf die Gefühlsqualitäten beeindruckender Inszenierungen, wenn sie im 17. Jahrhundert die Gebeine der Mathilde von Tuszien, der Verbündeten des „Canossa“-Papstes Gregor VII., in den Petersdom überführen und zu diesem Zweck ein Grabmal errichten ließ, auf dem die „Canossa“-Szene verewigt wurde. Eine nicht-heilige Verbündete der Kirche wurde als Stütze im Kampf gegen das Kaisertum vereinnahmt und damit zum Symbol des triumphierenden weltlichen Machtanspruchs der Kirche (Abbildung 5). Es handelte sich dabei um eine ekstatisch gesteigerte Barockfrömmigkeit, die dem katholischen Abwehrkampf in der nachreformatorischen Zeit Profil verlieh.

In der protestantischen Rezeption lässt sich beobachten, dass die „Demut“ als zentrale christliche Tugend einen Bedeutungswandel durchmacht. Verwies der Reformator Melanchthon noch auf die Tugend der Demut im Verhalten Heinrichs IV., empörte sich Friedrich II. von Preußen (auch „der Große“ genannt), dass der Papst den Kaiser zu den „erniedrigendsten und schimpflichsten Demütigungen“ gezwungen habe. Aus der aktiven, tugendhaften Demut wurde eine erduldete, von außen zugefügte Demütigung.

„Umgekehrtes“

Canossa im Aufklärungszeitalter

Ein noch nicht abgeschlossenes Untersuchungsfeld stellt der so genannte umgekehrte „Canossa“-Gang dar: 1782 reiste Papst Pius VI. zu Kaiser Joseph II. nach Wien, um ihn zur Rücknahme von Erlassen zu bewegen, die den Einfluss der katholischen Kirche erheblich einschränkten. Der Papst scheiterte. Dazu hieß es 1783 in einer Streitschrift, dass nun „die Schande“ abgewischt sei, mit der die „Teutschen bey Canossa 1077 so himmelschreyend erniedrigt worden“ seien. Mit dieser fundamentalen Umwertung des historischen „Canossa“-Gangs und seiner Lösung aus den historischen Deutungszusammenhängen war der Weg geebnet für ein sprichwörtliches „Canossa“ im bürgerlichen Zeitalter.



Abb. 5: Bronzestatuetten der „Canossa“-Markgräfin Mathilde anlässlich der Überführung ihrer Gebeine in den Petersdom im 17. Jahrhundert.



Abb. 6: „Canossa“-Säule von 1877 oberhalb von Harzburg zu Ehren Bismarcks.

III. „Canossa“-Polemik im Kirche-Staat-Konflikt des bürgerlichen Zeitalters

Seit dem frühen 19. Jahrhundert musste sich die katholische Kirche im deutschsprachigen Raum auf eine radikal neuartige Situation einstellen, nachdem sie in der „Säkularisation“ von 1803 ihrer weltlichen Herrschaftsstellung und eines Teils ihres Vermögens verlustig gegangen war. Die ungewohnte Abhängigkeit von staatlichen Instanzen führte immer wieder zu Spannungen im Kirche-Staat-Verhältnis. Trat der auf Autonomie bedachte katholische Klerus konfliktfreudig auf, griffen an erster Stelle bürgerlich-liberal gesinnte Kirchengegner auf das „Canossa“-Sprachbild zurück, um den katholischen Konservatismus als autoritär, herrschsüchtig und fortschrittsfeindlich zu brandmarken. Es ging im Streit um das Verhältnis von Staat und Kirche um vier Grundmodelle: 1. staatskirchliche Unterordnung der Religionsgemeinschaften, 2. Mischstruktur zwischen staatskirchlicher Unterordnung und kirchlicher Autonomie, 3. Kooperation zwischen Staat und freien Kirchen auf Basis des „Neutralitätsprinzips“ (Gleichbehandlung aller Religionsgemeinschaften) und 4. strikte Trennung von Staat und Kirchen. Wie sich das Verhältnis von Staat und Religionsgemeinschaften gestaltete, hing im 19. und 20. Jahrhundert an prominenter Stelle von den konfessionellen Kräfte- und Anteilsverhältnissen ab: Gemischtkonfessionelle Gesellschaften warfen andere kirchenpolitische Fragen auf als konfessionell homogene. Im Projektzusammenhang kam vor allem den Stärkeverhältnissen der katholischen Konfession Bedeutung zu.

Geflügelte Worte liberaler „Canossa“-Polemik

Die liberale „Canossa“-Polemik brachte im deutschsprachigen Raum zwei geflügelte Worte hervor, die einen großen Bekanntheitsgrad erlangten und sich auf das konfessionell fast homogene Österreich bzw. auf das gemischtkonfessionelle Deutsche Kaiserreich bezogen. In dem einen Fall prägte 1868 Anastasius Grün im Streit um das österreichische Konkordat von 1855 die Redewendung „gedrucktes Canossa“: Es ging dabei im katholischen Habsburger Reich um den Kampf der Liberalen gegen die staatskirchliche Privilegierung der katholischen Kirche, der im besagten Konkordat hoheitliche Aufgaben im kultur- und schulpoliti-



Abb. 7: Glosse der satirischen Wochenschrift „Kladderadatsch“ von 1860 zum päpstlichen Machtanspruch.

schen Bereich übertragen worden waren. Diese Kompetenzen verteidigten der katholische Klerus und dessen publizistische Speerspitze, die „Wiener Kirchenzeitung“, mit Rückendeckung der römischen Kurie äußerst zäh. In dem anderen Fall ging es um die Stellung der katholischen Kirche als Minderheitenkirche im gemischtkonfessionellen Deutschen Reich, wo Reichskanzler Otto von Bismarck 1872 den kulturkämpferischen Liberalen beschwichtigend versicherte: „Seien sie außer Sorge: Nach Canossa gehen wir nicht!“ Er pflichtete damit den Liberalen bei, die als treibende Kraft des Kulturkampfes den Einfluss der katholischen Kirche zurückdrängen wollten. 1877 errichteten die besonders militant auftretenden Nationalliberalen oberhalb von Harzburg eine „Canossa“-Säule, die Bismarck ermutigen sollte, der antikatholischen Kampffront treu zu bleiben und nicht auf die konservative Gegenseite überzuwechseln, wie er dies ein Jahr später tat, als sich konfessionsübergreifend eine neue konservative Parlamentsmehrheit fand (Abbildung 6).

Vergleichende Forschungen der universitären Projektgruppe

Es ist bemerkenswert, dass sich die staatskirchliche Einbindung der Kirchen in den gemischtkonfessionellen deutschen Staaten lockerer gestaltete als im konfessionell homogenen Österreich. An strukturellen Kontrasten dieser Art setzte die universitäre Projektgruppe mit ihren vergleichenden Forschungen zum Staat-Kirche-Verhältnis an. Es scheint, dass konfessionelle Pluralität im 19. Jahrhundert die staatskirchlichen Bestrebungen schwächte und auf längere Sicht – siehe Preußen nach der siebenjährigen Episode des Kulturkampfes – gemäßigten Formen der Kirche-Staat-Kooperation auf Basis des Neutralitätsprinzips Auftrieb gab. Konfessionelle Pluralität erschwerte staatskirchliche Bestrebungen, die kaum Privilegierungen bzw. Diskriminierungen hätten umgehen können aufgrund der unterschiedlichen Nähe der Staatsgewalt zu den einzelnen Konfessionen. Dies wiederum hätte schwere Integrationsprobleme aufgeworfen – ein gewichtiger Grund, warum Bismarck den Kulturkampf abbrach. Hingegen begünstigten monokonfessionelle Strukturen entweder staatskirchenähnliche Strukturen (wie in Österreich) oder laizistische Gegenbewegungen in Richtung einer rigorosen Trennung von Kirche und Staat (wie in Frankreich). Die konfessionellen

Strukturunterschiede hinterließen auch bei den regionalen Ausprägungen des Katholizismus ihre Spuren. Während der österreichische Mehrheits-Katholizismus zwischen den Polen eines autoritären Papst- und Kaisertums schwankte und sich daher kaum von autoritären Staatsvorstellungen und engen staatskirchlichen Bindungen zu lösen vermochte, öffnete sich der reichsdeutsche Katholizismus auf der Basis seiner Minderheitenstellung sehr bald gegenüber pluralistischem Staatsdenken und entwickelte eine prinzipiell staatskeptische Grundhaltung, die sich von den monarchistischen Leitbildern der römischen Päpste löste. Diesen Liberalkatholizismus, aus Not des konfessionellen Minderheitenstatus geboren, verkörperten an erster Stelle der Mainzer Bischof von Ketteler und der Führer der katholischen Zentrumsgruppe Ludwig Windthorst.

„Canossa“-Polemik

in der liberalen Aufbruchsära nach 1859

Die unterschiedlichen Konfessionslandschaften vermittelten der liberalen „Canossa“-Polemik unterschiedliche Akzentsetzungen. So konnte die Forschergruppe am Beispiel des liberalen Aufbruchs von 1859, der vom italienischen Einigungskrieg Impulse erhielt, gut nachzeichnen, in welchem konfessionellen Zusammenhang die geschichtspolitische Instrumentalisierung des „Canossa“-Sprachbildes stand. Als im Gefolge des italienischen Krieges die dortige Nationalbewegung europaweit zum Symbol des liberalen Fortschritts wurde und der Papst als Herrscher des Kirchenstaates und als Stütze der Adelherrschaft zum Inbegriff rückwärtsgewandter, konservativer Erstarrung, geriet auch die staatskirchliche Machtstellung des österreichischen Mehrheits-Katholizismus in die Schusslinie der Liberalen. Indem diese sich auf das „Canossa“-Ereignis rückbesannen, sprachen sie den Verdacht aus, dass der Katholizismus im Dienste eines päpstlichen Weltherrschaftsanspruchs stehe, dem sich auf Kosten des gesellschaftlichen Fortschritts auch Traditionsmächte wie die österreichische Monarchie zu beugen schienen. Diese Perspektive der österreichischen Liberalen griff eine Glosse des liberalen Witzblattes „Kladderadatsch“ auf, indem sie der „Wiener Kirchenzeitung“ im Frühjahr 1860 papstfromme Allmachtsfantasien unterschob, die sich den liberalen Reformenbestrebungen in den Weg stellten (Abbildung 7). An erster Stelle geriet das Konkordat von 1855 ins Visier der Kritiker, weil dieses Vertragswerk das österreichische Bildungswesen an die katholische Kirche ausgeliefert hatte. Ein Kulturkampf gegen die beherrschende Stellung der katholischen Staatskirche kündigte sich an. „Canossa“ wurde für die Liberalen zum Symbol der mahnenden Erinnerung.

Im Unterschied dazu offenbarte die liberale „Canossa“-Polemik in den gemischt-konfessionellen Territorien des Deutschen Bundes deutlich nationalpolitische Akzentsetzungen. So rückte etwa ein Historienbild aus den frühen 1860er Jahren die fragile Stellung der mittelalterlichen deutschen Zentralgewalt in den Vordergrund. Der „Canossa“-Gang des „deutschen“ Königs stellte sich dort als zutiefst zwiespältiges Ereignis dar (Abbildung 8). Genährt von der Aufbruchstimmung, die der Krieg in Italien der deutschen Nationalbewegung vermittelt hatte, präsentierte sich der „deutsche“ König durch die Brille des Malers betrachtet als ein stolz dreinblickender Herrscher, der sich unbeugsam und trotzig gab und sich nur aus taktischen Gründen dem Bußgang nach Canossa unterzog. Kein Büsserhemd, sondern ein golden

glänzendes Herrschergewand präsentierte das Gemälde und bannte damit das nationalromantische Volkskaiser-Ideal der deutschen Nationalbewegung auf die Leinwand. In einem erneuerten Kaisertum sahen die deutschen Liberalen die Idee einer machtvoll geeinten Bürgernation verkörpert. In der Herrschaft des Fürstenadels hingegen erblickten sie das entscheidende Hindernis auf dem Wege zur nationalen Einigung.

Dass mit Heinrich IV. ein „deutscher“ Herrscher in die Zwangslage eines „Canossa“-Ganges geriet, begriff das Gemälde im Geiste des liberalen Mittelalter-Bildes als Anklage an die Adresse der deutschen Fürsten, deren „Untreue“ den König überhaupt erst in die Lage gebracht hatte, die Vorrangstellung des Papstes akzeptieren zu müssen. Hier zeigt sich eine charakteristische nationalpolitische Doppelperspektive, die die antizentralistischen Herrschaftsinteressen der mittelalterlichen Fürsten mit der Adelherrschaft nach der gescheiterten Revolution von 1848 in eins setzte. Auf dem Gemälde sind gedanklich die inneren und äußeren Feinde der in Heinrich verkörperten deutschen Zentralgewalt präsent: zum einen der spaltende Konfessionsgeist in der gemischt-konfessionellen deutschen Staatenwelt, hier im fremdländischen, die deutsche Einheit bedrohenden Papsttum verkörpert, zum anderen die „national“ gewissenlosen Fürsten als unsichtbare Widersacher des Königs. Hier bestimmt die konfessionelle und territorialstaatliche Zerklüftung Deutschlands den Blick auf „Canossa“. Während aus der Perspektive österreichi-



Abb. 8: Historienbild von Educa Schwoiser (um 1860) zum „Canossa“-Gang Heinrichs IV. aus liberal-oppositioneller Sicht.

scher Liberaler die staatskirchlich beherrschende Kraft des Katholizismus im Vordergrund steht, sehnt sich die liberalnationale Perspektive in der gemischtkonfessionellen außerösterreichischen Staatenwelt nach einer überlebensgroßen einheitsstiftenden Kaisergestalt, die erst noch eine starke Zentralgewalt und möglicherweise eine deutsche Einheitskirche schaffen soll, freilich nicht auf katholischer, sondern auf nationalreligiöser Basis.

Gegenwartsbezüge der „Canossa“-Forschung

Die Perspektiven historischer Akteure unterscheiden sich teilweise beträchtlich von unseren heutigen, die den unbeabsichtigten Wirkungen des Konflikts zwischen Königsherrschaft und Papsttum ihre Aufmerksamkeit widmet und im Mittelalter den Grundstein für die neuzeitliche Gewaltenteilung zwischen geistlicher und weltlicher Sphäre gelegt sieht. Gewaltenteilung kann zu Recht als eine grundlegende Errungenschaft westlichen Freiheitsdenkens gelten, das in aufklärerischer Perspektive jedwede Machtzusammenballung ablehnt, vor allem aber die Konzentration von weltanschaulicher Deutungsmacht und staatlichem Gewaltmonopol. Vor diesem Hintergrund hat die Unabhängigkeit von Presse, Kirchen und Wissenschaft als Kernbestandteil freiheitssichernder Gewaltenteilung zu gelten: auf der einen Seite die Sphäre der Deutungsmächte und auf der anderen Seite das staatliche Gewaltmonopol. Ohne diese Trennung steht der moderne Freiheitsanspruch auf „tönernen Füßen“.

Literatur

Anonym (Christian David Ade): Lebens- und Regierungsgeschichte des jetzo glorreich regierenden Papsts Pius des VI. aus ächten und bewährten Quellen zusammengetragen 3, Ulm 1783.
Bronzestatue der Markgräfin Mathilde von Tuszien, in: Canossa 1077. Erschütterung der Welt. Geschichte, Kunst und Kultur am Aufgang der Romanik, Bd. II, Katalog, hrsg. von Christoph Stiegemann/Matthias Wemhoff, München 2006, S. 487.
Ein Artikel im Styl der Wiener Kirchenzeitung, in: Kladderadatsch, Jg. 13, Nr. 7, 12.2.1860, S. 26.
Ulrich von Hutten: Wie allwegen sich die Römischen Bischöf oder Bäpst gegen den teütschen Kayßeren gehalten haben (1521), in: Ders.: Deutsche Schriften I, Leipzig 1972, S. 225-244.
Jörg Jarnut/Matthias Wemhoff (Hg.), Vom Umbruch zur Erneuerung? Das 11. und beginnende 12. Jahrhundert – Positionen der Forschung, München 2006.
Dietmar Klenke, Bismarck, „Canossa“ und das deutsche Nationalbewusstsein, in: Canossa 1077. Erschütterung der Welt. Geschichte, Kunst und Kultur am Aufgang der Romanik, Bd. I, Essays, hrsg. von Christoph Stiegemann/Matthias Wemhoff, München 2006, S. 613-624, hier 613.
Mareike Menne, Zur Canossa-Rezeption im konfessionellen Zeitalter, in: ebd., S. 603-612.
Matthias Pape, „Nach Kanossa gehen wir nicht“. War Anastasius Grün (Graf Anton Auersperg) Bismarcks Stichwortgeber im Kulturkampf?, in: Eloquentia copiosus. Festschrift für Max Kerner zum 65. Geburtstag, hrsg. von Lotte Kéry, Aachen 2006, S. 245-264, hier 259.
Pape, Matthias: „Canossa“ – eine Obsession? Mythos und Realität, in: Zeitschrift für Geschichtswissenschaft Jg. 54, (2006), S. 550-572.
Eduard Schwoiser, Historien gemälde: Heinrich IV. vor dem Burg-

tor zu Canossa, Öl auf Leinwand, 1860, in: Canossa 1077. Erschütterung der Welt. Geschichte, Kunst und Kultur am Aufgang der Romanik, Bd. II, Katalog, hrsg. von Christoph Stiegemann/Matthias Wemhoff, München 2006, S. 499 ff.
Johannes Stumpf, Keyser Henrych des vierdten fünfftzigjehriges Historia, Zürich 1556.



Prof. Dr. phil. Jörg Jarnut ist Professor für Mittelalterliche Geschichte am Historischen Institut. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Frühmittelalters, der europäischen Stadtgeschichte und der interdisziplinären Personen-(namen)forschung.



Prof. Dr. phil. Stephan Müller ist Inhaber des Lehrstuhls für deutsche Sprache und Literatur des Mittelalters. Ein Schwerpunkt seiner Forschungen bildet die deutsche Literatur des Frühmittelalters.

Projektmitarbeiterinnen und Projektmitarbeiter sind Dr. Stefanie Dick, Martin Dröge, Dr. Nicola Karthaus, Sabrina Lausen und Dr. Mareike Menne.

Kontakt: Prof. Dr. phil. Dietmar Klenke

Tel.: 05251/60 2436

E-Mail: dietmar.klenke@uni-paderborn.de



Werben in Paderborn

Wir gestalten Ihren Auftritt

Die PADA Werbeagentur

bietet Ihnen rund um Ihr Produkt
oder Dienstleistung,
eine auf den Markt gerichtete
offensive Werbung.

Dabei realisieren wir für Sie
vom Internetauftritt über
Logoentwicklung, Geschäftspapiere,
Zeitschriften, Prospekte, Flyer,
Grafiken, Poster bis zum
3D-Modelling alles was Sie
zur Werbung benötigen.

P A D A

Kreatives Handels - Marketing

Martin Heynen • Heierswall 2 • 33098 Paderborn
Tel.: 0 52 51/52 75 77 • FAX: 0 52 51/52 75 78
E-mail: pada-werbeagentur@t-online.de • www.pada-werbeagentur.de



Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr

Theorie und Praxis verbinden

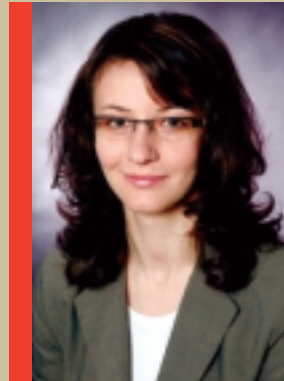
Jun.-Prof. Dr. rer. pol. Natalia Klierer

Die Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) beinhaltet die Erstellung der Umlaufpläne für die Fahrzeuge und der Dienstpläne für die Fahrer. Um im Wettbewerb für die ÖPNV-Dienstleistungen bestehen zu können, sind die Verkehrsbetriebe auf einen effizienten Ressourceneinsatz angewiesen. Für die Fahrzeugeinsatzplanung bedeutet es insbesondere, dass die operativen Kosten und die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge minimiert werden sollen. Die komplexen Aufgaben, die sich dabei dem ÖPNV-Planer stellen, können ohne Einsatz moderner leistungsfähiger Software nicht mehr gemeistert werden. Der Trend auf dem Markt für die Planungssoftware besteht in der Integration der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem Bereich Operations Research. Das Know-how der mathematischen Optimierung wird in diesem Markt zunehmend überlebenswichtig sowohl für die Anbieter der Planungssoftware als auch für den Endanwender – die Verkehrsbetriebe selbst. Für die Forscher heißt die Herausforderung sich aus der „Labor- und Theoriewelt“ nach außen zu trauen und den Anforderungen der Praxis zu stellen.

Planungsprozess im ÖPNV

Der Planungsprozess im öffentlichen Personennahverkehr lässt sich grundlegend in strategische und operative Planung unterteilen. Das Ziel dieser Planung ist eine möglichst kostengünstige und trotzdem hochqualitative Bedienung der Reisewünsche von Personen im Nahverkehr. Die Planung ist aufgrund zahlreicher Anforderungen, die es zu berücksichtigen gilt, ein komplexer Prozess. Die Abbildung 1 zeigt eine Übersicht strategischer und operativer Aufgaben mit jeweiligem Ergebnis. Auf strategischer Ebene wird mit der Ermittlung des Beförderungsbedarfes und Bestimmung der ÖPNV-Infrastruktur (Verkehrsnetz, Haltepunkte) gestartet. Die operative Planung wird grob in die Teilaufgaben Linienplanung, Fahrplanerstellung sowie Fahrzeugumlauf- und Dienstplanung zerlegt, die in der Praxis üblicherweise hierarchisch in der genannten Reihenfolge geplant werden. Die Linien- und Fahrpläne werden für die ÖPNV-Kunden als Aushänge an den Haltestellen veröffentlicht.

Die anschließende Ressourceneinsatzplanung stellt die Ausführung der festgelegten Fahrten zur Personenbeförderung sicher, indem Fahrzeuge und Fahrer zur Abdeckung dieser Fahrten eingeplant werden. Betrachten wir eine Linienfahrt: Es ist eine Fahrt zur Personenbeförderung, die im Fahrplan mit einer Start- und einer Endhaltestelle und mit entsprechenden Abfahrts- und Ankunftszeiten angegeben ist. Weiterhin legt der



Jun.-Prof. Dr. rer. pol. Natalia Klierer ist seit Oktober 2005 Juniorprofessorin für Wirtschaftsinformatik und Operations Research an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.

Planer für jede solche Fahrt eine Menge der Fahrzeugtypen, die diese Fahrt ausführen dürfen (Fahrzeugtypgruppe) fest. Beispiele für Fahrzeugtypgruppen sind „Großraum-“, „Niederflur-“ oder „behindertengerechte Fahrzeuge“.

In der Buseinsatzplanung (auch als Umlaufplanung bezeichnet) werden die im Fahrplan enthaltenen Personenbeförderungsfahrten den Fahrzeugen zugeordnet, so dass jede Fahrt mit einem Fahrzeug von einem passenden Typ bedient wird und die einem Fahrzeug zugeordneten Fahrten nacheinander fahrbar sind, also keine zeitlichen Überschneidungen verursachen. Diese Fahrten ergeben einen Fahrzeugumlauf. Allgemein wird mit einem Umlauf die Fahrtroute eines Fahrzeuges für einen Betriebstag beschrieben. Die Umlaufplanung im ÖPNV zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass ein Fahrzeug seinen Tagesumlauf in einem Betriebshof starten und am Ende des Tages zum gleichen Ort zurückkehren muss. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass Leerfahrten zum Standortwechsel zwischen der Ausführung von Fahrplanfahrten erlaubt sind. Das heißt, dass ein Bus nach der Ausführung einer planmäßigen Linienfahrt seinen Standort ändern darf, indem er zu einer anderen Haltestelle leer fährt, um dort die nächste Servicefahrt bedienen zu können. Solche Leerfahrten verursachen zusätzliche Kosten, dafür kann der Fahrplan mit einer geringeren Anzahl an Fahrzeugen bedient werden. Die Abbildung 2 zeigt Beispiele für einen Fahrplanausschnitt, einen grafischen Fahrzeugumlaufplan mit farblicher Unterscheidung der Umläufe und einem entsprechenden Ausschnitt des Liniennetzes sowie eine Tagesganglinie des Fahrzeugeinsatzes unterteilt nach Fahrzeugtypen.

Ein Tagesumlauf für ein Fahrzeug stellt somit eine Sequenz von Aktivitäten, wie Servicefahrten, Leerfahrten und Wartezeiten dar, die im Laufe eines Arbeitstages nacheinander von einem Fahrzeug ausgeführt werden. Die Gesamtheit der Fahrzeugumläufe

Planungsaufgabe		Ergebnis
strategisch	Bedarfsermittlung	Quell-Ziel-Daten
	Angebotsplanung	Systeme, Tarife, Verfügbarkeit
	Netzplanung	Infrastruktur
operativ/taktisch	Linienplanung	Linienverlauf, Fahrzeitprofile
	Fahrplanerstellung	Fahrplan mit Fahrgastfahrten
	Fahrzeugumlaufplanung	Fahrzeugumläufe
	Tagesdienstplanung	Tagesschichten
	Dienstreihenfolgeplanung	Dienstplan

Abb. 1: Hierarchie der Planungsaufgaben im ÖPNV.



Fotos: Kiewer

wird in einem Umlaufplan festgehalten. Die Gesamtkosten eines Umlaufplans ergeben sich aus fixen (Anschaffungskosten) und variablen (Kraftstoffkosten) Komponenten und sind bei der Planung der Umläufe zu minimieren. Die beschriebene Planungsaufgabe wird in der Operations Research-Literatur als das Umlaufplanungsproblem (engl.: vehicle scheduling problem, VSP) bezeichnet.

Ist für jede Fahrt die Zuordnung zu einem Depot und einem Fahrzeugtyp vorgegeben oder ist insgesamt nur ein Depot und ein Fahrzeugtyp vorhanden, so handelt es sich um das Eindepot-Umlaufplanungsproblem, das mit relativ geringem Aufwand (mit wachsender Problemgröße steigt die benötigte Berechnungszeit langsam – polynomiell) gelöst werden kann.

Mehrdepot-Umlaufplanung

Schwieriger gestaltet sich die Lösung des Umlaufplanungsproblems, wenn für eine Fahrt mehrere Depots oder unterschiedliche Fahrzeugtypen zum Einsatz kommen können. Dabei ist einerseits zu beachten, dass die Schnittmenge der Fahrzeugtypgruppen aller von einem Fahrzeug zu bewältigenden Fahrten nicht leer ist und andererseits, dass ein Fahrzeug am Ende eines Betriebstages zum selben Depot zurückkehrt, aus dem es morgens zum ersten Einsatzort ausgerückt war. Es gilt also, einen Umlaufplan zu bestimmen, der

- alle Fahrten eines gegebenen Fahrplans abdeckt,
- die Anforderungen an Fahrzeugtypen und Depot-Rückkehr erfüllt und
- minimale Gesamtkosten für das Verkehrsunternehmen verursacht.

Diese Aufgabe wird als das Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem (engl.: multiple depot vehicle scheduling problem, MDVSP) bezeichnet. Weil jede Fahrplanfahrt von mehreren Depots und mit einigen bestimmten Fahrzeugtypen bedient werden kann, besitzt die Problemstellung eine hohe Komplexität – die möglichen Kombinationen der Fahrten zu Umläufen sind praktisch unzählig und unter all diesen Kombinationen soll die optimale

bestimmt werden. Wie [Bertossi, Cararesi 1987] zeigen, ist das Mehrdepot-Umlaufplanungsproblem NP-hart. Das bedeutet, dass die zum Finden einer optimalen Lösung benötigte Zeit mit der wachsenden Problemgröße, also mit Erhöhung der Anzahl der Fahrplanfahrten, der Depots und der zur Verfügung stehenden Fahrzeugtypen sehr schnell (exponentiell) anwächst.

Optimierung der Fahrzeugumläufe

Für die Optimierung des Fahrzeugeinsatzes wurden verschiedene Modelle und Verfahren in der OR-Literatur vorgeschlagen. Die Verfahren aus der Literatur, die leistungsfähig genug sind, um Instanzen aus der Praxis kostenoptimal zu lösen, basieren auf unterschiedlichen Varianten der Column Generation Methode und weiteren fortgeschrittenen Techniken. Notwendig sind diese Techniken, weil die verwendeten Modelle (stellvertretend sei auf [Löbel 1999] verwiesen) eine sehr hohe Anzahl von Entscheidungsvariablen beinhalten. Die große Anzahl der Entscheidungsvariablen in den konventionellen Modellen aus der Literatur liegt daran, dass jede mögliche Verkettung von zwei Fahrten, die nacheinander von einem Fahrzeug bedient werden können, explizit als Kante im Modellnetzwerk und/oder als Entscheidungsvariable dargestellt wird. Diese Art der Modellbildung führt dazu, dass die größeren Probleminstanzen nicht mit der gängigen Optimierungssoftware (wie z. B. ILOG CPLEX oder MOPS) gelöst werden können, sondern einen Einsatz spezialisierter Verfahren erfordern. Dies führt aber in der Regel zu einer Einschränkung der Aspekte, die im Modell berücksichtigt werden können.

Also ist es hier besonders wichtig, das Problem so zu modellieren, dass die Anzahl der Entscheidungsvariablen nicht unnötig groß wird. Die Anzahl der Möglichkeiten, wie die Fahrten zu Umläufen verkettet werden können und wie diese den Depots und den Fahrzeugtypen zugeordnet werden können, explodiert regelrecht mit der wachsenden Problemgröße. Schuld daran ist die Kombinatorik – die unzähligen Möglichkeiten wie die Fahr-



Abb. 2a

ptv interplan

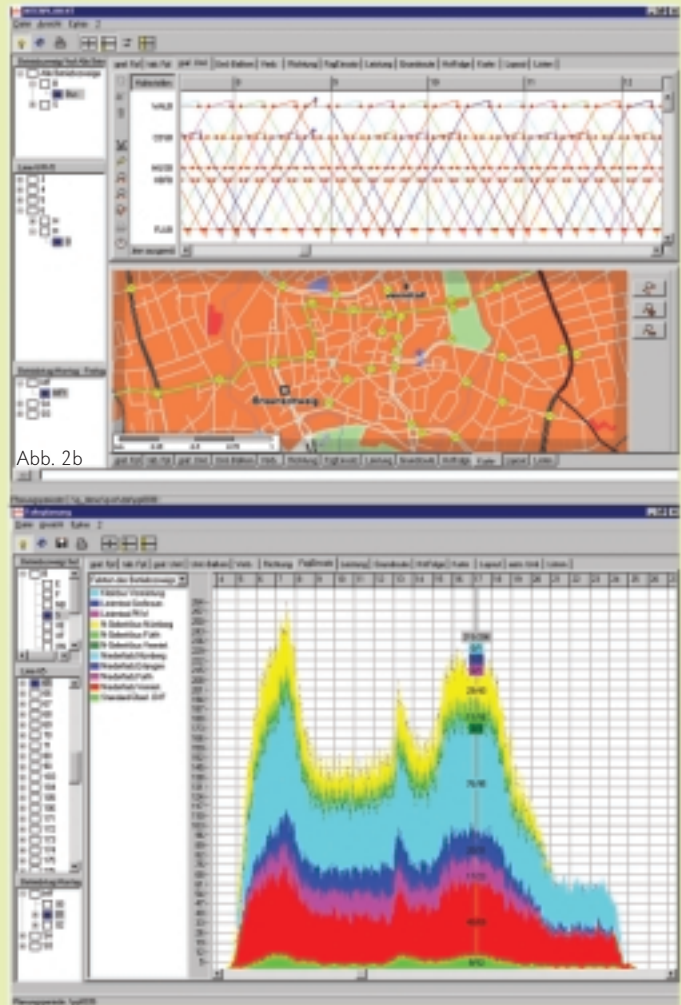


Abb. 2c

Abb. 2a: Aushangfahrplan.

Abb. 2b: Grafischer Fahrzeugumlaufplan mit farblicher Unterscheidung der Umläufe und einem entsprechenden Ausschnitt des Liniennetzes.

Abb. 2c: Tagesganglinie des Fahrzeugeinsatzes unterteilt nach Fahrzeugtypen.

ten miteinander verknüpft werden können. Alle Möglichkeiten müssen im Modell Berücksichtigung finden, damit die beste Lösung bestimmt werden kann.

Alternative Modellierung mit Time-Space-Netzwerken

Im Bereich der Flugplanung wurden für verwandte Problemstellungen alternative Modellierungsansätze erprobt (s. [Barnhart et al. 1996]), die die potenziellen Aktivitäten der Flugzeuge als Knoten und die möglichen Ereignisse (Abflug, Landung usw.) als Knoten in einem so genannten Time-Space Netzwerk abbilden. Die möglichen Flugzeugrouten entsprechen gerichteten Wegen in diesem Netzwerk, und eine alle Flüge abdeckende und gleichzeitig kostenminimale Zusammensetzung solcher Wege liefert einen optimalen Plan für den Flugzeugeinsatz. Der Vorteil dieser Modelle liegt in der Vermeidung expliziter Berücksichtigung von allen möglichen Flugverkettungen. Diese werden nun vielmehr implizit als Wege im Netzwerk realisiert, was durch die Einführung der so genannten Bodenkanten möglich ist. Basierend auf dieser Technik wurde am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, DS&OR Lab im Rahmen einer Forschungs-kooperation mit der PTV AG ein Time-Space-Netzwerk basierter Ansatz zur Lösung der Umlaufprobleme im ÖPNV entwickelt

(vgl. [Kliewer et al. 2006]). Die Modelle aus der Flugplanung konnten für die Buseinsatzplanung nicht direkt übernommen werden, da die Anforderungen in beiden Anwendungsbereichen sich in vielerlei Hinsicht unterscheiden, insbesondere weil in der Busumlaufplanung die Fahrzeugtypgruppen, multiple Depots und uneingeschränkte Leerfahrten zum Standortwechsel berücksichtigt werden müssen.

Das neue Modell vermeidet die Schwachstellen der existierenden Ansätze und macht dadurch sehr große reale Probleminstanzen mit zusätzlichen praktischen Anforderungen und Rahmenbedingungen in akzeptabler Zeit ohne Einsatz spezialisierter Algorithmen lösbar.

Das Forschungsprojekt „Mehrdepot-Umlafoptimierung“ lieferte folgende Ergebnisse:

- die Möglichkeit einer Modellierung und Lösung des Mehrdepot-Umlaufplanungsproblems mit Hilfe eines Time-Space Netzwerkes wurde untersucht,
- die Anforderungen aus der Praxis wurden in dem neuen Modell abgebildet, um die praktische Anwendbarkeit zu sichern,
- es wurden Lösungsverfahren entwickelt, die eine Lösung auch für extrem große Probleminstanzen, insbesondere für Großstädte in annehmbarer Zeit ermöglichen,

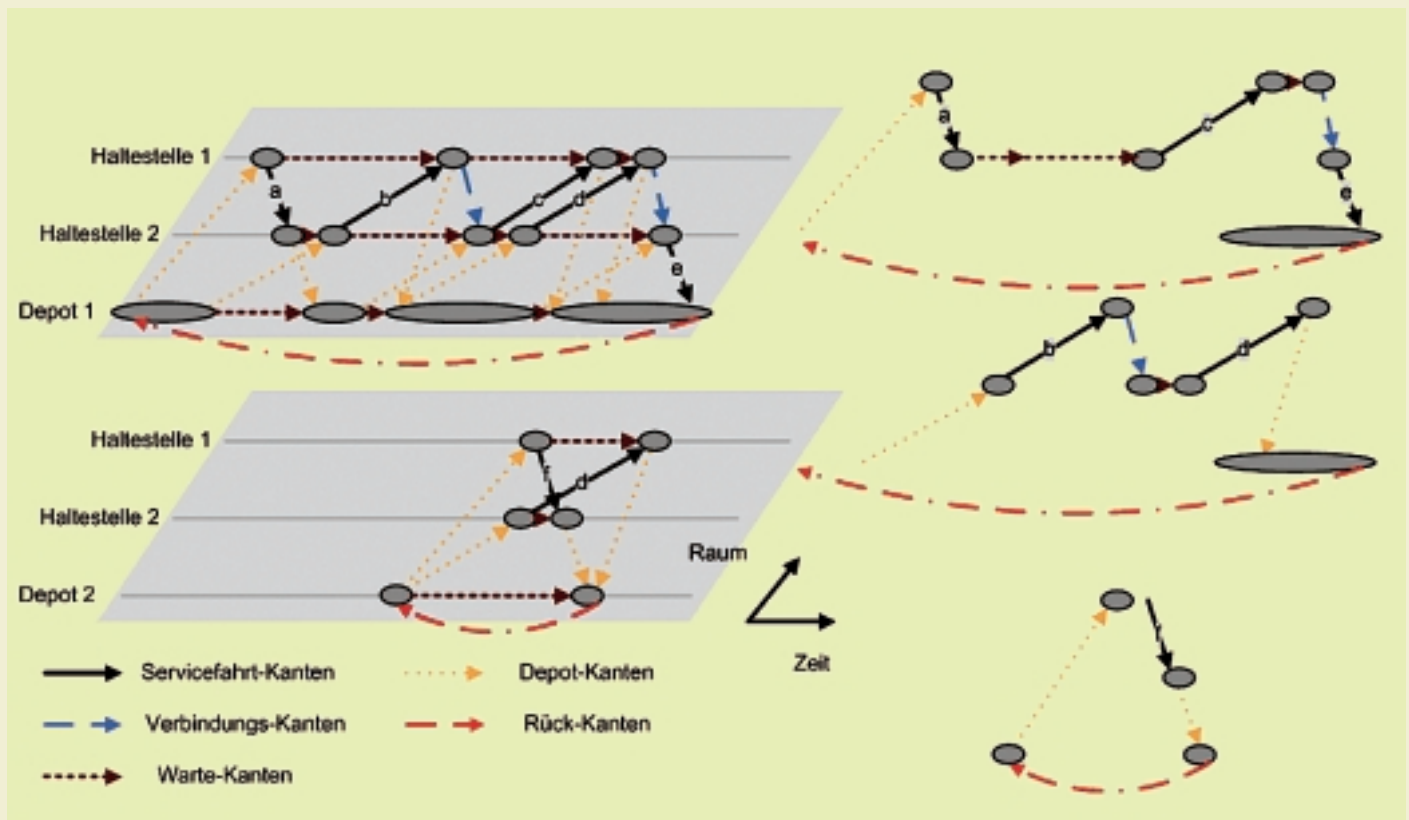


Abb. 3: Netzwerk-Modell für die Umlaufplanung und die optimalen Fahrzeugumläufe.

- die Modelle und die Lösungsverfahren wurden in einem Software-System implementiert,
- die Möglichkeit des praktischen Einsatzes wurde durch zahlreiche Testläufe mit unterschiedlichen Fällen aus der Praxis belegt.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Lösung der Mehrdepot-Umlaufplanungsprobleme besteht in einer schrittweisen Formulierung der abstrakten Modelle und einer anschließenden Lösung des gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems mit Hilfe marktüblicher Optimierungsoftware.

Das Netzwerkmodell besteht aus mehreren Netzwerkschichten (eine Schicht für jede zulässige Fahrzeugtyp-Depot-Kombination) und enthält Kanten für alle möglichen Fahrzeugaktivitäten, wie z. B. Fahrgastfahrten, Leerfahrten und Standzeiten in den Haltestellen. Dabei werden die Fahrplanfahrten als Kanten dargestellt, deren Anfangs- und Endereignisse durch Warte- oder Leerfahrtskanten miteinander verbunden sein können. Es wird das Transitivitäts-Prinzip für die Kompatibilität der Fahrten benutzt: Falls Fahrt C nach der Fahrt B ausgeführt werden kann, und Fahrt D in der gleichen Haltestelle wie C später startet, kann auch Fahrt D nach der Fahrt B ausgeführt werden. In den „klassischen“ Modellen würde in diesem Fall eine Kante die Fahrten B und D explizit verbinden. In dem hier verwendeten Modell ist so eine Kante redundant, da die Verbindung durch den in einer Haltestelle „wartenden“ Fluss bereits berücksichtigt wird.

Die Abbildung 3 illustriert die Konstruktion eines Zeit-Ort-Netzwerkes. Der Fahrplan, bestehend aus sechs Fahrten (a, b, c, d, e, f) wird hier in einem Netzwerk abgebildet. Das Netzwerk besteht aus zwei Schichten, die den vorhandenen Fahrzeugtypen (A und B) entsprechen. Die Fahrt d kann von Fahrzeugen beider Typen gefahren werden, die Fahrten a, b, c und e nur von Fahrzeugen des Typs A und die Fahrt f nur von Fahrzeugen des Typs B. Die Start- und Endereignisse der Fahrten sind als Knoten des Netz-

werks, aggregierte Zeit-Raum Punkte, dargestellt. Sie sind durch weitere Netzwerkkanten miteinander verbunden, die unterschiedliche mögliche Aktivitäten der Fahrzeuge wie Standort wechseln, warten oder zum Depot zurückkehren darstellen. Nun können die möglichen Fahrzeugumläufe als Wege im Netzwerk dargestellt werden. Die rechte Seite der Abbildung 3 enthält eine Lösung dieses Problems – sie besteht aus drei Fahrzeugumläufen. Es werden zwei Fahrzeuge vom Typ A und eins vom Typ B eingesetzt. Das erste Fahrzeug (vom Typ A) fährt beispielsweise vom Depot zur Haltestelle 1, bedient dann die Fahrten a und c, fährt anschließend leer zu der Haltestelle 2, um von dort aus die Fahrt e auszuführen.

In derartigen Modellen gilt nun eine quasi-lineare statt einer quadratischen Abhängigkeit der Anzahl möglicher Verbindungsfahrten von der Anzahl aller Linienfahrten. Jedes Paar von kompatiblen Servicefahrten ist hier über einen Pfad verbunden, der aus Leerfahrts- und/oder Wartekanten in einer oder beiden Anschlusslinien besteht. Durch derartige Modellierung wird der oben beschriebene Nachteil der Modelle aus der Literatur mit expliziten Fahrtenverknüpfungen umgangen. Die Anzahl der Kanten im Time-Space-Netzwerk ist viel kleiner, die Menge der zulässigen Lösungen des Umlaufplanungsproblems bleibt aber weiterhin komplett. Somit kann man mit diesem Ansatz optimale Lösungen für viel größere Probleminstanzen, als mit den bekannten klassischen Ansätzen erreichen. Die Vergleiche auf den Probleminstanzen realer ÖPNV-Unternehmen ergeben eine Reduktion von 97 bis 99 Prozent in der Anzahl entsprechender Fahrtenverbindungs-Kanten.

Praktischer Einsatz

Um die Lösungszeiten weiter zu reduzieren beziehungsweise extrem große Probleminstanzen aus der Praxis lösen zu können

wie z. B. die der Münchner Verkehrsgesellschaft mbH, die mit keinem existierenden exakten Verfahren lösbar sind, wurden approximative Modelle und Verfahren erarbeitet. Dabei werden einige Fahrten im Vorfeld der Optimierung zu Teilumläufen miteinander verknüpft. Auf diese Weise kann der Lösungsraum erheblich reduziert werden, ohne sich bemerkbar von der optimalen Lösung zu entfernen.

Das vorgeschlagene Modell wurde darüber hinaus um spezielle Anforderungen ergänzt, die sich beim praktischen Einsatz der Methoden in verschiedenen ÖPNV-Betrieben ergeben. Der Planer kann Kapazitäten verschiedener Art berücksichtigen, z. B. Stellplatzkapazitäten, Begrenzungen in der Fahrzeugflotte sowie feste Vorgaben für die Anzahl von Fahrzeugen bestimmter Typen in bestimmten Depots. Im Modell integriert wurden die Möglichkeiten einer Vergabe von Fahrleistungen an Fremdunternehmen sowie zeitliche Verschiebeintervalle für Fahrten zwecks Fahrzeugeinsparung. Auf Wunsch des ÖPNV-Planers können die Fahrzeugeinsatzpläne in Bezug auf die Linienreinheit verbessert werden, ohne dabei auf die Kostenminimalität zu verzichten.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten Modelle und Methoden wurden in die kommerziellen Betriebsplanungssysteme der PTV Planung Transport Verkehr AG integriert und werden in der Planung des Fahrzeugeinsatzes mehrerer ÖPNV-Unternehmen verwendet. Aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich ÖPNV-Planung am DS&OR Lab beinhalten eine Verfeinerung der Verfahren zur Umlaufplanung, Entwicklung von

Komponenten für die Planung der Fahrdienste, eine integrierte Betrachtung benachbarter Planungsaufgaben sowie Robustheit der Pläne auf allen Planungsebenen.

Literatur

- [Barnhart et al. 1996] Barnhart, C., Johnson, E., Nemhauser, G., Savelsbergh, M., and Vance, P. (1996). Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, 4.
- [Bertossi et al., 1987] Bertossi, A., Carraraesi, P., and Gallo, G. (1987). On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17:271–281.
- [Kliewer et al. 2006] Kliewer, N., Mellouli, T., and Suhl, L. (2006). A time-space network based exact optimization model for multi-depot bus scheduling. *European Journal of Operational Research (EJOR)*, 175(3).
- [Löbel 1999] Löbel, A. (1999). Solving large-scale multiple-depot vehicle scheduling problems. In Wilson, N., editor, *Computer-Aided Transit Scheduling*. Springer, Berlin.

Kontakt: Jun.-Prof. Dr. rer. pol. Natalia Kliewer

Tel.: 05251/60 5238

E-Mail: kliewer@upb.de

Sonderausstellung

Computer.Medizin

Hightech für Gesundheit und Lebensqualität

25. Oktober '06 – 1. Mai '07

www.computer-medizin.de

Museum's Forum

Heinz Nixdorf

Fürstenallee 7
Paderborn

Di, Do, Fr 9-18 Uhr
Mi 9-20 Uhr
Sa, So 10-18 Uhr

H
N
F

**DEN KOPF VOLLER IDEEN,
EIN KLARES ZIEL VOR AUGEN.**



**RIGHT
CHAIRING**

Wer kann, der darf: Ob Sie im Rahmen eines Praktikums erstmals Berufsalltag schnuppern, Ihre Diplomarbeit bei uns schreiben oder mit abgeschlossener Ausbildung bei uns starten wollen – wir haben für ehrgeizige Einsteiger immer einen Stuhl frei. Als international ausgerichtetes Unternehmen suchen wir Denker, Macher und Talente aus unterschiedlichen Bereichen. Und weil wir 75% unserer Führungskräfte aus den eigenen Reihen besetzen wollen, stehen Ihre Chancen bei uns auch langfristig gut.

Nachwuchskräfte für unterschiedliche Fachbereiche

- **Praktikanten**
- **Diplomanden**
- **Absolventen**

Weidmüller ist der führende Hersteller von Komponenten für die elektrische Verbindungstechnik. Zu dem Weidmüller-Produktportfolio zählen Reihenklemmen, Steck- und Leiterplattenverbinder, geschützte Baugruppen, Industrial Ethernet Komponenten sowie Relaiskoppler bis hin zu Stromversorgungs- und Überspannungsschutz-Modulen in allen Anschlussarten. Material zur Elektroinstallation und Betriebsmittelkennzeichnung, E/A-Basiskomponenten und Werkzeuge runden das Programm ab. Als OEM-Anbieter setzt das Unternehmen dabei weltweit Standards in der elektrischen Anschluss- und Verbindungstechnik. Weltweit beschäftigt Weidmüller derzeit insgesamt rund 2.600 Mitarbeiter und ist in mehr als 70 Ländern für seine Kunden tätig. Weidmüller erzielte im Geschäftsjahr 2005 einen Umsatz von 385 Mio. Euro.

Weidmüller Interface GmbH & Co. KG
– Akademie – Schul- und Hochschulbetreuung
Postfach 30 30, 32760 Detmold
Bewerberhotline: 0 52 31 / 14-18 74
E-Mail: hochschulbetreuung@weidmueller-akademie.de
Gehen Sie uns ins Netz:
www.weidmueller.com

Wer alles gibt, gibt nie zu wenig

Weidmüller

Nie wieder Auto waschen?!

Entwicklung selbstreinigender Lackierungen

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser, M. Sc. Björn Weber

Das Fach Beschichtungstechnologie greift als Querschnittswissenschaft auf unterschiedlichste Bereiche zu, von der Betriebswirtschaft über Polymer- und Physikalische Chemie sowie Maschinenbau bis zur Verfahrenstechnik und verknüpft sie zu einer Material- und Prozesswissenschaft. Zu den aktuellen Themen der Paderborner Arbeitsgruppe „Chemie und Technologie der Beschichtungsstoffe“ (CTB) um Prof. Wolfgang Bremser gehören u. a. Dispersionen, schaltbare Lacke sowie die so genannten „Easy to Clean“- oder „selbstreinigenden“ Oberflächen. Der Begriff der „selbstreinigenden“ Oberflächen fasst drei unterschiedliche technische Ansätze zur Haftungsminimierung von Schmutz auf Oberflächen zusammen.

Coatings Science an der Universität Paderborn

Zunächst ist der allorts bekannte Lotus-Blatt-Effekt zu nennen, des Weiteren die ultra-hydrophoben (extrem wasserabweisenden) und die ultra-hydrophilen (extrem wasserliebenden) Oberflächen. Alle derartigen Oberflächen sind nicht im wörtlichen Sinne „selbstreinigend“, aber sie erfordern einen vergleichsweise geringen Reinigungsaufwand.

Die zur Ausbildung des hoch gepriesenen Lotuseffektes notwendige Mikrorauigkeit der Oberfläche wird technisch mithilfe unpolarer Wachs- oder Kunststoffpartikel realisiert; eine derartig feinmechanisch strukturierte Oberfläche stellt aber damit gleichzeitig das größte Manko des 1:1 von der Natur kopierten Systems dar. Die Lotuspflanze kann „abgenutzte“ Blattoberflächen relativ rasch erneuern oder ersetzen, ein riesiger Vorteil gegenüber den sich üblicherweise nicht selbst regenerierenden



Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser leitet seit 2002 das Fachgebiet Chemie und Technologie der Beschichtungsstoffe an der Universität Paderborn. In seiner Dissertation beschäftigte er sich mit der Synthese von Mikronetzwerken durch Mikroemulsionspolymerisation – Charakterisierung und Dynamik in der Schmelze. Anschließend erfolgte sein Eintritt in die BASF Coatings in Münster. Von 1991–1997 beschäftigte er sich mit der Entwicklung von Elektrotauchlacken. Es folgte 1997 die Übernahme der Projektleitung „Lösemittelfreie Lacke für alle Anwendungsgebiete“.

Lackoberflächen. Aufgrund mangelnder mechanischer Beständigkeit und matten optischen Erscheinungsbild wird der Lotuseffekt heute kaum mehr als ernstzunehmender technischer Lösungsansatz betrachtet.

Die zweite Möglichkeit besteht in der Verwendung von glatten, ultrahydrophoben Oberflächen, wie sie durch entsprechende chemische Synthese der Beschichtungsstoffe durch den Zusatz von Fluor- oder Silicon-Bausteinen erhalten werden. Hierbei genügt es aber nicht, die extreme Hydrophobie nur an der Oberfläche zu realisieren. Sie muss sich vielmehr auch im Inneren des Films ausbilden, damit es z. B. nach Abwitterung der oberen Filmschichten noch zur Schmutzabweisung bzw. zur leichten Schmutzentfernung kommt. Fluorverbindungen sind in diesem Fall häufig die Substanzen der Wahl.

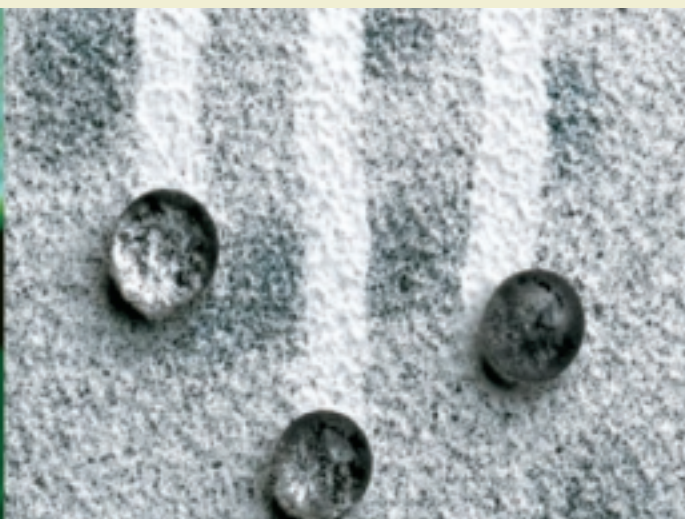


Abb. 1: Lotusblatteffekt in der Natur sowie bei einer neuartigen Fassadenfarbe.



Abb. 2: Reitwagen von Gottlieb Daimler.

Auch ultra-hydrophile Oberflächen sind selbstreinigend. Wasser benetzt bekanntlich die sehr polare Oberfläche von sauberem Glas oder auch die Innenseite von Muschelschalen (Perlmutter) vollständig und unterkriecht somit potenzielle Verunreinigungen. Technisch werden organische Verunreinigungen durch Photooxidation (chemische Reaktion, die durch Licht ausgelöst wird) an oberflächlich vorhandenem TiO_2 in der Grenzfläche zusätzlich oxidativ zerstört. Wasser kann die Verunreinigungen wegschwemmen.

Bremsstaub auf Automobilfelgen

Im Automobilbau sind Aluminiumfelgen und Radzierblenden zu einem wichtigen Designelement geworden. Diese Schmuckstücke sollen möglichst stets sauber bleiben, zumindest leicht zu reinigen sein. Fast jeder Autofahrer kennt jedoch das Problem der stark verschmutzten Felgen, die sich entweder nur mit sehr viel Aufwand oder, mit zunehmendem Alter der Felge, nicht mehr vollständig reinigen lassen. Bremsstaub haftet auf Felgen und Radzierblenden und lässt sich selbst bei größter Anstrengung kaum entfernen.

Auch mit einer Vielzahl von handelsüblichen Felgenreinigern ist das Problem mehr schlecht als recht gelöst, da meist der versprochene Erfolg verfehlt wird.

Einflussgrößen, die während der Lebensdauer einer Felge bzw. eines Autos die Lackierung angreifen können, sind u. a.:

- UV-Licht (Sonne),
- Wetter (Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit),
- Ätzende Chemikalien (Streusalz, Vogelkot),
- Beschuss der Lackierung mit Bremsstaub.

Die früheren Probleme bei der Lackierung von Felgen, wie z. B. mangelnde Haftung des Klarlacks oder Vergilbung durch Einwirkung von Hitze und UV-Licht, sind in den heutigen Lacksystemen gut gelöst.

Das Problem der Verschmutzung durch Einwirken von Bremsstaub besteht jedoch weiterhin. Dabei liegt das Problem nicht in der kurzzeitigen, frischen Verschmutzung; diese lässt sich relativ leicht entfernen. Vielmehr soll im Folgenden die dauerhafte Verschmutzung, welche erst nach einer gewissen Betriebszeit bzw. Kilometerlaufleistung auftritt, betrachtet werden.

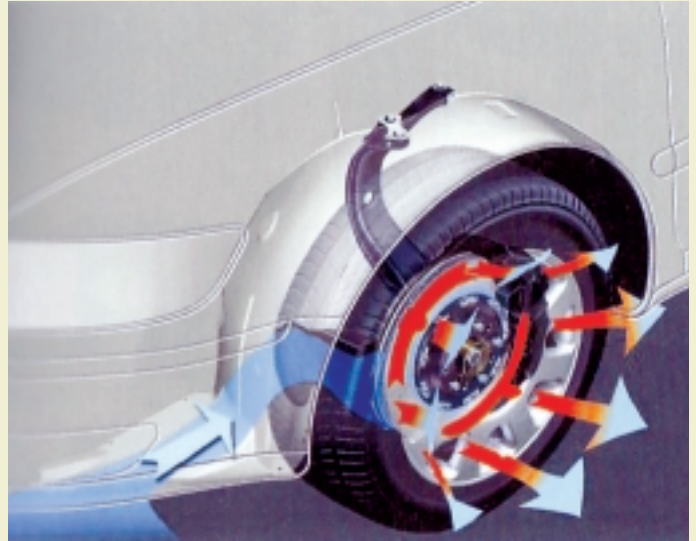


Abb. 3: Luftführung zur Bremsenkühlung.

Grundlagen der Bremstechnologie

Für die meisten Autofahrer ist die Bremsanlage das wichtigste Bauteil eines Kraftfahrzeugs. Bei historischen Fahrzeugen, wie z. B. dem berühmten Reiterwagen von Gottlieb Daimler, waren die Reibwerte im Antriebsstrang so hoch, dass auch ohne Betätigung einer Bremse das Fahrzeug effektiv verzögerte. In der heutigen Zeit hat sich dieses deutlich verändert.

Ein PKW mit einer Motorleistung von etwa 100 kW und einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h benötigt typischerweise eine Bremsleistung von mehr als 800 kW, um das Fahrzeug sicher auf der Straße zu halten.

Dabei müssen die Bremsbeläge und die Bremsscheiben extremen thermischen Belastungen standhalten. Bei einer normalen Stadtfahrt und Bremsung vor einer Ampel erwärmen sich die Bremsen auf bis zu 200° C. Bei Autobahnfahrten und starkem Abbremsen können Temperaturen bis zu 550° C auftreten. Bei Passabfahrten entstehen Temperaturen bis zu 750° C an den Bremsscheiben und -belägen. Zusätzlich werden die Felgen auf Temperaturen bis etwa 100° C erhitzt. Bremsbelag und Bremsscheibe stellen eine so genannte Reibpaarung dar; ein Bremsvorgang kann nicht ohne Verschleiß ablaufen. Bei jedem Bremsvorgang wird ein kleiner Teil des Bremsbelags und der Bremsscheibe abgerieben.

Durch die hohen Temperaturen, die beim Bremsvorgang entstehen, ist eine optimale Bremsenkühlung notwendig. Dazu wird gezielt Luft von innen nach außen durch das Rad geleitet. Dadurch gelangt unvermeidlich auch der Bremsstaub auf die Felgen. Zwei Drittel der Bremskraft liegen an den Vorderrädern. Deshalb liegt hier die größte Verschmutzung vor.

Modellvorstellung zur Schmutzanhaftung

Generell sind verschiedene Vorstellungen bezüglich der Anhaftung von Bremsstaubpartikeln auf lackierten Oberflächen denkbar:

- Heiße Partikel können sich sowohl physikalisch in den Lack einbrennen als auch chemisch an diesen anbinden.
- Die hohen Felgentemperaturen, die während starker Bremsvorgänge entstehen, erweichen den Lack und führen so zu einer Schmutzanhaftung.

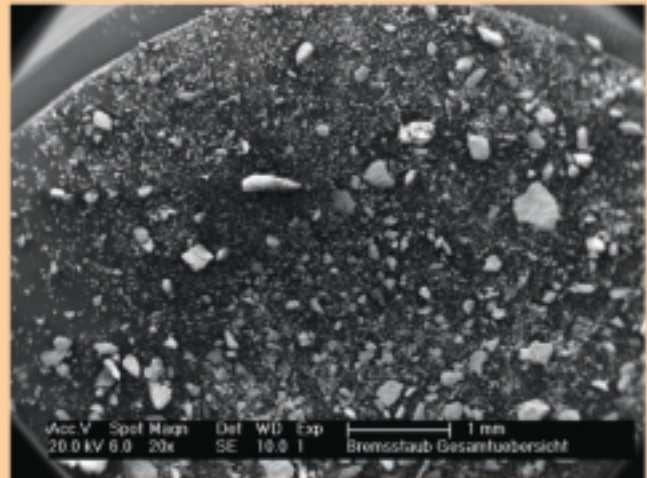
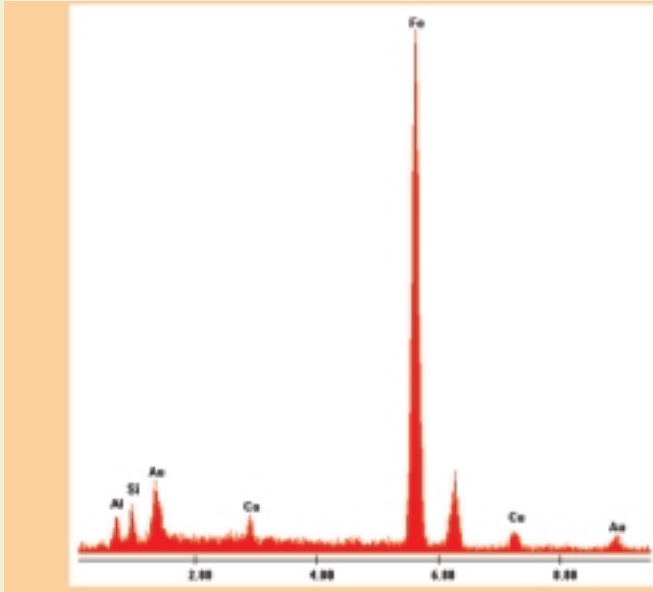


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Bremsstaubpartikeln (rechts) sowie das zugehörige Röntgen Spektrum (EDX Spektroskopie zur elementspezifischen Bestimmung) (links).

- Durch mechanische Beanspruchung und Umwelteinflüsse bilden sich Rauigkeiten auf der Lackoberfläche aus, an denen sich Schmutzpartikel anlagern können.
- Die Polarität der Oberfläche kann ebenfalls zur Partikelhaftung führen.

Die Kenntnis über die vorherrschenden Anhaftungsmechanismen ist essentiell zur Entwicklung neuer Strategien gegen die Verschmutzung von Oberflächen. Hierzu ist es zunächst erforderlich, die chemische Zusammensetzung der Bremsstaubpartikel aufzuklären, um anschließend mit weiteren Analysemethoden die Vorgänge beim Auftreffen der Partikel detailliert zu bestimmen.

Aus Röntgen-Fluoreszenzmessungen (Abbildung 4) lassen sich die Bestandteile der Schmutzrückstände bestimmen. Bei der Analyse wird fast reines Eisen gefunden. Das Ergebnis ist überraschend, da die Bremsbeläge nur zu 30 Prozent aus Eisen bestehen. Woher kommt also das viele Eisen? Auf dem Lack landet sowohl der Abrieb aus den Bremsbelägen als auch der Abrieb aus den Bremsscheiben, welche nahezu zu hundert Prozent aus Eisen bestehen.

Mit hochauflösenden mikroskopischen Methoden (z. B. Rasterelektronenmikroskopie, AG Prof. Maier, LWF, Fak. MB) lässt sich feststellen, wo sich dieser Abrieb auf dem Lack niederlässt (Abbildung 4). Die Partikel lagern sich nicht primär an Beschädigungen der Oberfläche an sondern sind vielmehr statistisch auf dieser verteilt.

Neue Felgenlacke in der Anwendung

Um den Einfluss unterschiedlicher Lackeigenschaften auf die Anhaftung von Schmutzpartikeln zu testen, wurden neue, innovative Lackierungen im Fach CTB in Kooperation mit der Herforder Peter Lacke GmbH entwickelt. Einerseits unterscheiden sich diese Beschichtungen hinsichtlich ihrer Erweichungstemperaturen (Glasübergangstemperatur), sodass der Einfluss der Temperatur der Partikel und der Felge auf die Verschmutzung des Lackes untersucht werden konnte. Andererseits wurden unterschiedliche Oberflächenpolaritäten eingestellt, um die Anhaftung der eisenhaltigen Teilchen zu beeinflussen. Diese

neuartigen Felgenlacke wurden in Feldversuchen getestet. Dazu wurden Automobile eines namhaften deutschen Herstellers mit den verbesserten Beschichtungen ausgestattet und einem Langzeittest mit 20 000 Kilometern Laufleistung unterzogen. Weiter-



Abb. 5: Bremsenprüfstand.



Abb. 6: Nahaufnahme des Bremsenprüfstandes mit neu lackiertem Testblech.



Abb. 7: Radzierblenden nach 20 000 Kilometern Laufleistung im Dauertest. Links: Neuartige Lackierung; rechts: Herkömmliche Lackierung.

hin konnte ein großer Bremsbelaghersteller für Versuche an dessen Bremsenprüfständen gewonnen werden. Dadurch konnten die neuen Lacke unter definierten Laborbedingungen auf ihre Schmutzanfälligkeit hin getestet werden.

Neuartige Beschichtungen mit verbesserten Eigenschaften

Es liegt nahe, bei den auftretenden hohen Temperaturen zunächst zu vermuten, dass die Erweichungstemperatur der Lackierungen der entscheidende Parameter für die Verschmutzung ist. Erstaunlicherweise konnte sowohl in den Langzeittests als auch unter Laborbedingungen am Bremsenprüfstand gezeigt werden, dass die Glasübergangstemperatur nicht der ausschlaggebende Faktor für die Verschmutzungen ist. Weiche als auch harte Lacke zeigen ähnliches Verhalten. Der Fokus lag daher auf der Polarität der neuen Beschichtungen. Durch neuartige Zusätze (moderne Fluorpolymere) konnten ultra-hydrophobe Oberflächen erzeugt werden, welche in den beschriebenen Testreihen hervorragende Ergebnisse hinsichtlich der Verschmutzungsanfälligkeit zeigten.

Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppe CTB konnte in Kooperationen mit verschiedenen industriellen Partnern einen Beitrag zur Verbesserung technischer Oberflächen leisten. Es ist gelungen, den Verschmutzungsmechanismus sowie die Zusammensetzung des Bremsstaubes aufzuklären. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch ultra-hydrophobe Modifizierung der Lackoberfläche mit Hilfe von modernen Fluoradditiven das Verschmutzungsverhalten von Automobilfelgen sehr positiv beeinflusst werden kann. Die dargestellte Untersuchung zum Thema „Easy to Clean“ stellt nur einen kleinen Ausschnitt des interessanten Arbeitsgebietes der Technologie der Beschichtungsstoffe dar.

Bildnachweise

Abb. 1: http://www.lotusan.de/lotusan/_01_home/index.jsp
sowie: http://www.nees.uni-bonn.de/lotus/de/lotus_effect_multimedia.html

Abb. 2: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Daimler-Reitwagen_Nachbau_451_338px.jpg

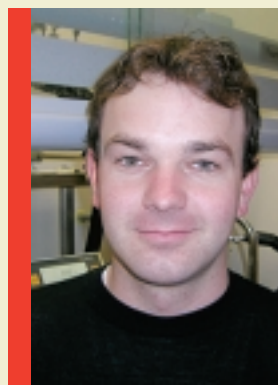
Abb. 3: Bremsenhandbuch, Breuer B., Bill K. H., ATZ/MTZ – Fachbuch, vieweg Verlag.

Alle restlichen Abbildungen:

Weber, B.; Bremser, W.; Ba-Arbeit, Paderborn 2004.

Literatur

Weber, B.; Bremser, W.; Ba-Arbeit, Paderborn 2004.



M. Sc. Björn Weber ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl der Chemie und Technologie der Beschichtungsstoffe bei Prof. Dr. Wolfgang Bremser. Im Rahmen seiner Dissertation beschäftigt er sich mit der Synthese Stabilisatorfreier wässriger Dispersionen und anschließender Mineralisation.

Kontakt: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Bremser

Tel.: 05251/60 2590

E-Mail: Wolfgang.Bremser@tc.upb.de

Qualitätssicherung für Nanochips

Wie IT-Produkte zuverlässig werden

Prof. Dr. rer. nat. Sybille Hellebrand

Die Fortschritte in der Halbleitertechnologie erlauben es, immer komplexere Systeme auf einem Chip zu integrieren, und schaffen damit faszinierende Möglichkeiten für immer neue Produkte. Dem gegenüber stehen immer störanfälligere Herstellungsprozesse, die eine Produktion defektfreier Chips so gut wie ausschließen. Auch die Störanfälligkeit der Chips während des Betriebs nimmt zu. Mithilfe eingebauter Korrektur-, Reparatur- und Rekonfigurationsmechanismen lassen sich die Systeme „fehlertolerant“ entwerfen. Aber gerade solch ein „robuster“ Entwurf erschwert die Qualitätssicherung und erfordert neue Ansätze bei Verifikation und Test. Statt nur zu prüfen, ob ein System funktioniert oder nicht, muss auch festgestellt werden, wie gut das System gegen neue Fehler geschützt ist.

„Systems-on-a-Chip“

Gordon Moore, einer der Mitbegründer von Intel, hat bereits 1965 die rasante Entwicklung in der Mikroelektronik vorausgesagt. Nach dem „Mooreschen Gesetz“ verdoppelt sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip alle ein bis zwei Jahre. Während 1971 der erste Intel-Mikroprozessor aus 2 300 Transistoren aufgebaut war, besteht das neueste Modell im Jahr 2006 aus über einer Milliarde Transistoren. Die Strukturgrößen auf dem Chip, also z. B. die Breite einer Metallbahn, liegen dabei bereits bei 65 nm. Die Fortschritte in der Informationstechnolo-



Prof. Dr. rer. nat. Sybille Hellebrand leitet das Fachgebiet Datentechnik am Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik seit Dezember 2004. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Test und Diagnose von Schaltungen und Systemen.

gie haben aber nicht nur zu immer leistungsfähigeren Computern geführt, sie ermöglichen es auch, dass in immer mehr Anwendungsbereichen Elektronik auf kleinstem Raum Steuerungs- und Informationsverarbeitungsaufgaben übernimmt. Komplexe Systeme, die früher aus mehreren Chips auf einer Platine aufgebaut werden mussten, lassen sich heute in einem einzigen Chip integrieren. Beispiele für solche „Systems-on-a-Chip“ (SoCs) finden sich im Handy mit eingebauter Kamera und E-Mail Funktion genauso wie in extrem sicherheitskritischen Anwendungen in der Automobilelektronik oder in der Medizintechnik.

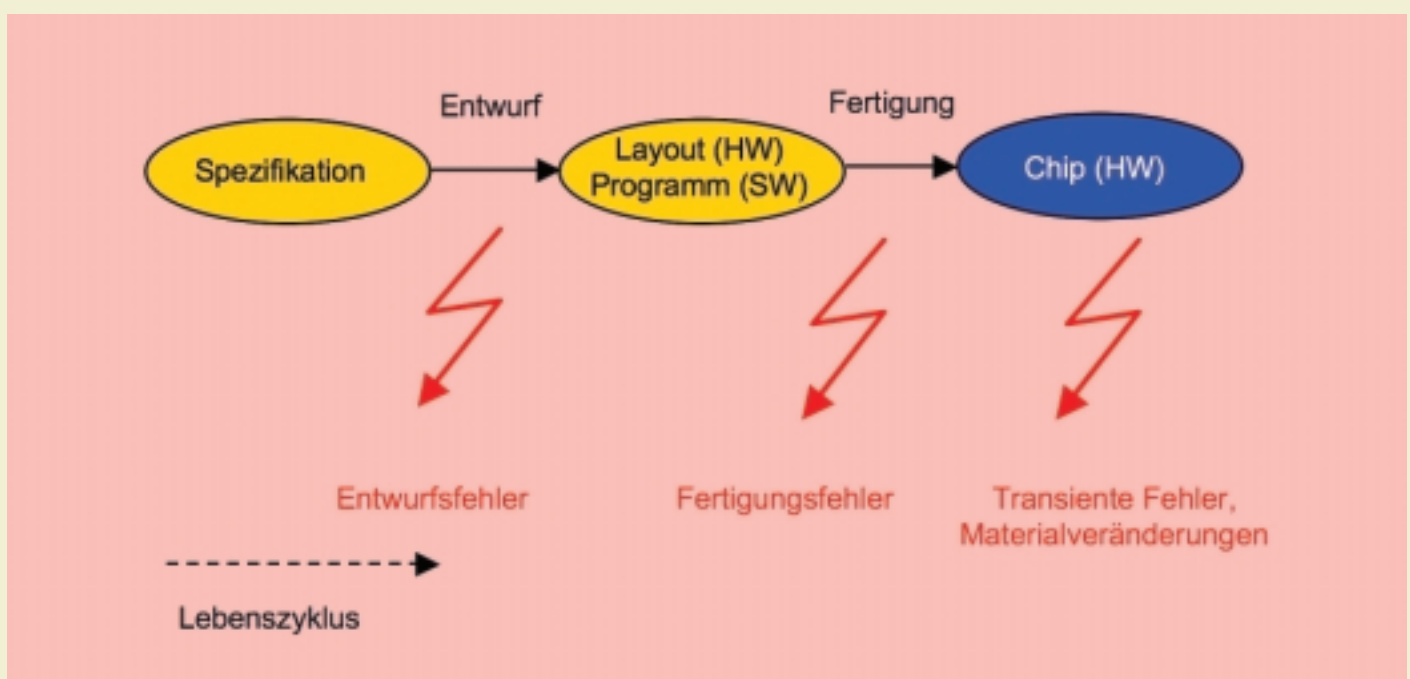


Abb. 1: Fehlerursachen bei „Systems-on-a-Chip“.

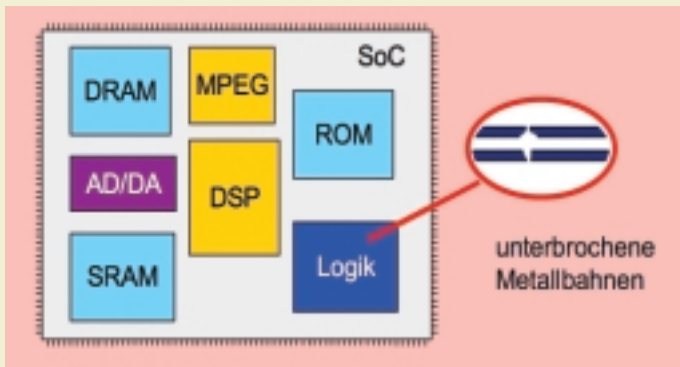


Abb. 2: „System-on-a-Chip“ mit verschiedenen Speicherfeldern (DRAM, SRAM, ROM), MPEG-Dekoder (MPEG), digitalem Signalprozessor (DSP), Analog-/Digital-Wandler (AD/DA) sowie anwendungsspezifischer Logik. Durch einen Fertigungsdefekt sind im Logikblock zwei Verbindungsleitungen unterbrochen.

Die Qualitätssicherung für SoCs stellt eine große Herausforderung dar. Wie Abbildung 1 zeigt, gibt es eine ganze Reihe unterschiedlicher Fehlerursachen, die zu einem Versagen des Systems führen können. Beim Chip-Entwurf wird zunächst aus einer genauen Beschreibung der gewünschten Systemfunktion (Spezifikation) eine Beschreibung der Strukturen auf dem Chip („Layout“) erzeugt. Dieser Schritt entspricht in etwa der Programmentwicklung beim Software-Entwurf, und Entwurfsfehler („Bugs“) müssen wie dort durch formale Beweise und aufwendige Simulationen ausgeschlossen werden. Aber auch bei vollständig korrektem Entwurf treten bei der Chipfertigung sehr häufig Defekte in der Hardware auf. „Zufällige“ Defekte können z. B. dadurch entstehen, dass feinste Staubpartikel beim Aufbringen der Metallbahnen zu Unterbrechungen in Verbindungsleitungen führen (vgl. Abbildung 2). Die zunehmende Genauigkeit, mit der die einzelnen Prozessschritte durchgeführt werden müssen, führt außerdem dazu, dass selbst minimale Schwankungen im Herstellungsprozess zu Parametervariationen führen. Beispielsweise ist an verschiedenen Stellen des Chips mit verschiedenen Signallaufzeiten zu rechnen. Während früher die zufälligen Defekte die meisten Probleme bereiteten, stellen heute die zunehmenden Parameterschwankungen die größte Herausforderung bei der Qualitätssicherung dar.

Während der weiteren Lebensdauer des Systems sind Materialveränderungen die Ursache für neue Defekte. Um fehlerhafte Chips zu erkennen und auszusortieren, muss deshalb jeder einzelne Chip nach der Produktion und wiederholt während des gesamten Lebenszyklus getestet werden.

Während des Betriebs können außerdem äußere Störeinflüsse wie etwa Strahlung ein vorübergehendes („transientes“) Fehlverhalten bewirken oder auch zu neuen permanenten Fehlern im System führen. Bei hohen Sicherheitsanforderungen muss das System durch ständige Überwachung auch dagegen abgesichert werden.

Integrierte Infrastruktur für den Test

Für den Fertigungstest werden die Chips in Testgeräte eingesetzt, die gezielte Testmuster an die Eingangspins anlegen und die Testantworten an den Ausgangspins aufnehmen und speichern können [2]. Hochleistungstester müssen die Tests mit hoher Geschwindigkeit durchführen können, da insbesondere auch geprüft werden muss, ob der Chip mit der geplanten Betriebsgeschwindigkeit fehlerfrei arbeitet. Ein Tester für SoCs muss außer-

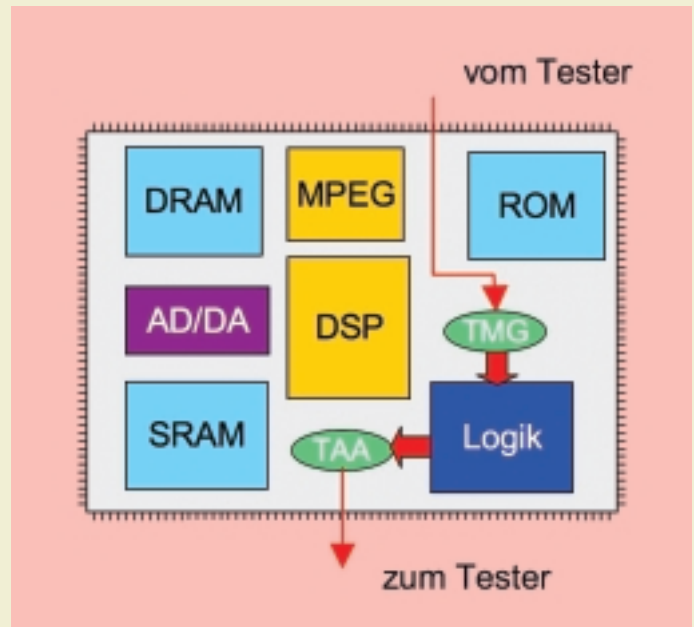


Abb. 3: Eingebetteter Test. Zwischen Tester und Chip genügt eine Verbindung geringer Bandbreite. Komprimierte Testdaten werden vom Testmuster-generator (TMG) expandiert, der Testantwortauswerter (TAA) kompaktiert die Testantworten.

dem in der Lage sein, Tests für Komponenten mit unterschiedlicher Technologie wie Speicher oder Logik zu erzeugen. Er muss also über alle Funktionen verfügen wie die entsprechenden Spezialtester für Speicherchips oder Logikchips. Solche Testgeräte sind sehr teuer, und die Anschaffungskosten wachsen mit der Zahl der anzuschließenden Pins (Testerkanäle). Deshalb versucht man, die notwendigen Testdaten über möglichst wenige Pins ins System zu bringen. Da die Testdaten für SoCs in der Regel sehr umfangreich sind, wird die Verbindung zwischen Chip und Tester zum Flaschenhals und die Testzeiten erhöhen sich beträchtlich. Außerdem sind manche Komponenten von außen nur schwer oder gar nicht zugänglich.

Diese Probleme lassen sich umgehen, wenn Funktionen zur Testmustererzeugung und zur Testantwortauswertung ganz oder teilweise in das System integriert werden. Abbildung 3 verdeutlicht dieses Prinzip des „eingebetteten Tests“. Die Testdaten werden auf einem kostengünstigen Testgerät in komprimierter Form abgespeichert. Während des Tests genügen wenige Testerkanäle für den Datentransport zum Chip. Der Testmuster-generator (TMG) auf dem Chip expandiert die Daten und stellt sie als Eingabedaten der zu testenden Komponente zur Verfügung, im Beispiel dem Logikblock. Die Testantworten werden dann von einem Baustein zur Testantwortauswertung (TAA) kompaktiert und nach außen an den Tester weitergegeben.

Testdaten lassen sich sehr gut komprimieren, da häufig nur wenige Eingänge einer Komponente belegt werden müssen, um einen bestimmten Fehler nach außen sichtbar zu machen. Die restlichen Eingänge spielen für das spezielle Testmuster keine Rolle und können so belegt werden, dass eine gute Komprimierung, beispielsweise mit Lauflängenkodierung oder als Startwert eines autonomen Mustergenerators, möglich ist (vgl. z. B. [3]). Die Testdaten für große Schaltungen aus der Industrie enthalten meist mehr als 95 Prozent solcher „Don't Cares“.

Um zu erkennen, dass ein Fehler vorliegt, muss in der Regel auch nicht die vollständige Testantwort analysiert werden. Zur Kompaktierung einer einzelnen Testantwort genügt es z. B. eine

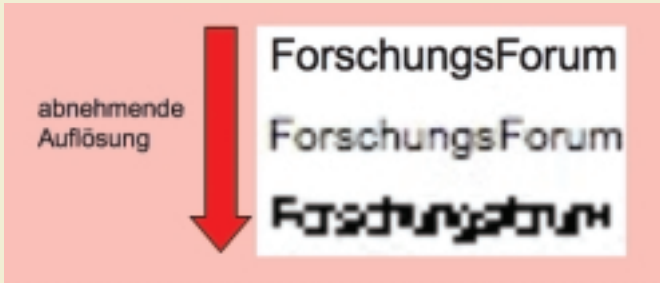


Abb. 4: Bildwiedergabe mit abnehmender Auflösung.

Art „Quersumme“ zu bilden. Eine ganze Folge von Testantworten wird durch „Rest“ bei einer „Division mit Rest“ bereits sehr gut charakterisiert.

Im Idealfall erzeugt der Testmuster-generator die Testdaten völlig autonom auf dem Chip und das Auswertungsmodul liefert nur noch die Information, ob der Chip funktioniert oder nicht. In diesem Fall spricht man von eingebautem Selbsttest, da das Testgerät nur noch den Test anstoßen und das fertige Gesamtergebnis übernehmen muss. Die Hardware für den eingebetteten Test bzw. für den Selbsttest kann für die später notwendigen periodischen Wartungstests wiederverwendet werden und erleichtert damit die Qualitätssicherung während des gesamten Lebenszyklus.

Von der Mikro- zur Nanoelektronik

Die fortschreitende Technologieentwicklung führt zu immer kleineren Strukturen im Nanometerbereich und bietet damit viele neue Möglichkeiten, wie etwa die Integration ganzer Rechnercluster auf einem einzigen Chip. Gleichzeitig werden die Herstellungsprozesse jedoch empfindlicher gegenüber Störungen [6]. Bei extrem kleinen Strukturen spielen bereits quantenphysikalische Effekte eine Rolle, und die einzelnen Herstellungsschritte erfordern eine viel größere Genauigkeit.

Beispielsweise arbeiten Lithografieverfahren, die zur Chipherstellung eingesetzt werden, bereits heute mit Lichtwellenlängen, die größer sind als die zu erzeugenden Strukturen. Die Effekte sind ähnlich wie bei einer Bildwiedergabe mit zu geringer Auflösung. Wenn der Schriftzug „Forschungsforum“ wie in Abbildung 4 mit abnehmender Auflösung wiedergegeben wird, verschwimmen die Konturen und vorher klar getrennte Linien berühren sich.

Bei Lithografieverfahren für Strukturen unterhalb der Lichtwellenlänge würde das z. B. Kurzschlüssen zwischen Metallbahnen entsprechen. Um trotzdem die gewünschten Strukturen zu erhalten, sind aufwändige Korrekturverfahren notwendig.

Insgesamt ist bei nanoelektronischen Chips mit zahlreichen Defekten und mit großen Schwankungen der Schaltungsparameter, wie z. B. der Schwellspannung der Transistoren, zu rechnen. Dabei müssen sowohl Abhängigkeiten der Parameter von der Position auf dem Chip als auch Materialveränderungen im Verlauf der Zeit stärker als bisher berücksichtigt werden. Schätzungen der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ gehen davon aus, dass bei fortschreitender Technologieentwicklung bis zum Jahr 2019 Strukturgrößen von 7 nm erreicht werden, aber nur noch zwischen 10 Prozent und 20 Prozent der produzierten Chips defektfrei sind [5]. Gleichzeitig wird es immer schwieriger die Ursachen für Fehlverhalten genau zu erkennen. Diese beiden Trends sind in Abbildung 5 noch etwas genauer skizziert.

Alle defekten Systeme wie bisher durch Tests einfach auszusortieren, würde keine wirtschaftliche Produktion mehr erlauben. Hinzu kommt außerdem noch eine erhöhte Anfälligkeit der Systeme gegenüber äußeren Störeinflüssen während des Betriebs. Bisher waren hauptsächlich Speicherkomponenten von äußeren Störungen betroffen, und andere Komponenten wurden wegen der geringeren Fehlerwahrscheinlichkeit nur bei extrem sicherheitskritischen Anwendungen, wie etwa in der Luft- und Raum-

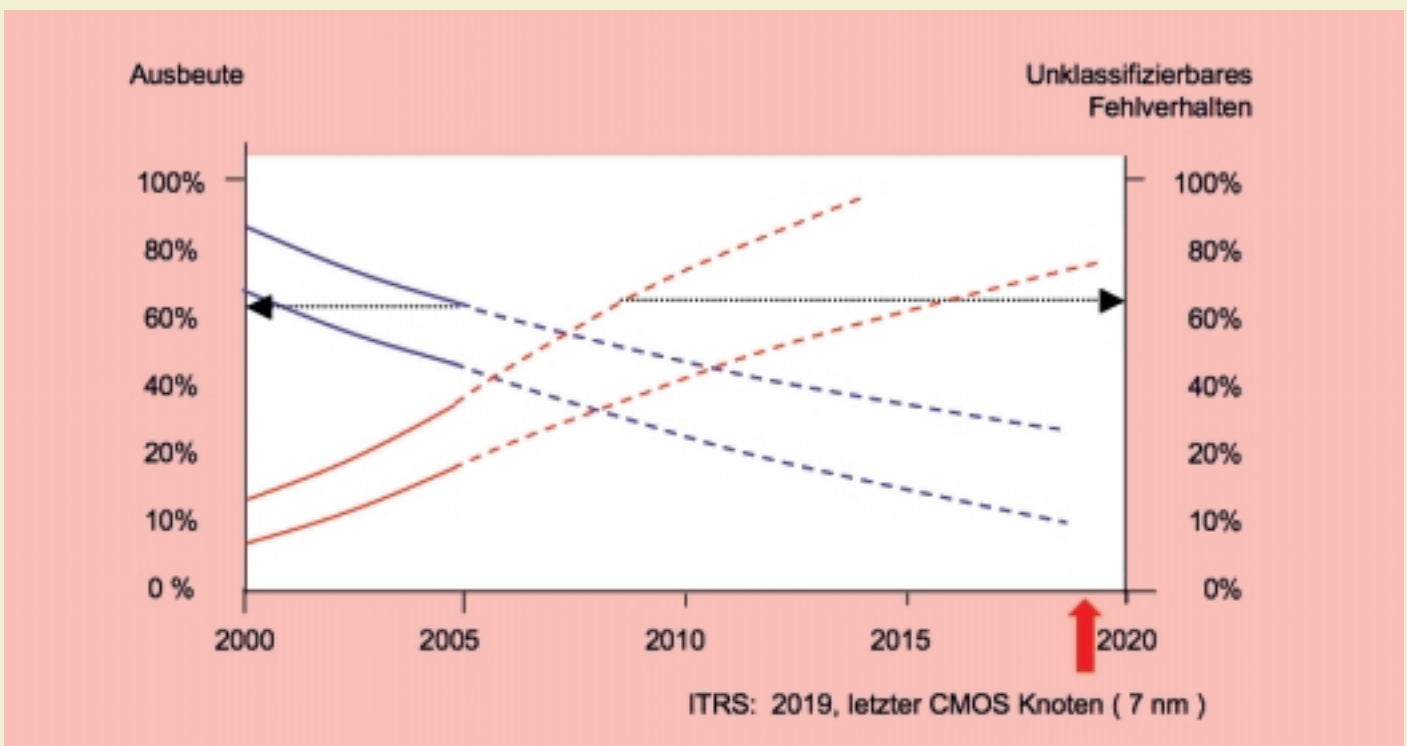


Abb. 5: Prognose der International Technology Roadmap for Semiconductors. „Ausbeute“ bezeichnet den Anteil defektfreier Chips an der Gesamtproduktion. Die Kurven für „Ausbeute“ (blau) und „Unklassifizierbares Fehlverhalten“ (rot) geben jeweils die obere und die untere Schranke für die erwartete Entwicklung an.

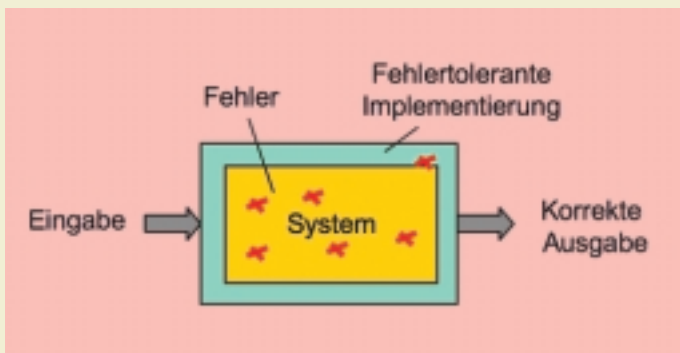


Abb. 6: Fehlertolerantes System.

fahrt, gegen Fehler während des Betriebs abgesichert. Mit zunehmender Störanfälligkeit nimmt jedoch die Fehlerwahrscheinlichkeit zu, und der Systembetrieb wird auch bei geringeren Sicherheitsanforderungen empfindlich beeinträchtigt.

Um wirtschaftliche Ausbeuten zu erzielen und die zunehmende Zahl von Fehlern während des Betriebs zu kompensieren, müssen vermehrt Maßnahmen zur Fehlertoleranz eingesetzt werden. Fehlertolerante Systeme implementieren die gewünschte Funktion nicht mit minimalen Ressourcen sondern setzen Redundanz ein, um bei Fehlern trotzdem noch das richtige Ergebnis rekonstruieren zu können. In Abbildung 6 ist dieses Prinzip durch eine zusätzliche grüne Schicht, die Fehler abfängt, angedeutet.

Redundanz kann aktiv oder passiv eingesetzt werden. Bei passiver Redundanz werden Fehler unbemerkt kompensiert. Klassisches Beispiel dafür ist die n-fach modulare Redundanz, bei der n gleiche Komponenten parallel die gleiche Funktion berechnen und das Mehrheitsergebnis ausgegeben wird. Bei aktiver Redundanz wird das System überwacht und beim Auftreten eines Fehlers ein Mechanismus zur Fehlerbehebung gestartet. Bei transienten Fehlern genügt es häufig, zum letzten sicheren Systemzustand zurückzugehen und die Berechnung noch einmal durchzuführen. Bei permanenten Fehler muss zunächst der Fehler genau lokalisiert („Diagnose“) und dann z. B. durch Reparatur oder Rekonfiguration behoben werden.

In beiden Fällen bringt solch ein „robuster“ Entwurf neue Herausforderungen für die Qualitätssicherung mit sich. Durch die eingebaute Redundanz wird die gezielte Aktivierung und Beobachtung von Fehlern noch schwieriger als bisher. Darüber hinaus sind übliche Qualitätsmaße für den Test wie „Fehlerüberdeckung“ nicht mehr aussagekräftig, da durch den robusten Entwurf ja auch ein bestimmtes Maß an Fehlern toleriert werden soll. Stattdessen wird vom Produktions- und Wartungstest eine Aussage benötigt, in welchem Umfang Fehlertoleranzmechanismen bereits ausgenutzt wurden und wie gut der verbleibende Schutz gegen weitere Fehler noch ist. Um die aktive Redundanz gegenüber Fehlern während des Betriebs zu unterstützen, sind effiziente Methoden für den „Online“ Test und für die „Online“ Diagnose notwendig.

Die aktuellen Forschungsarbeiten in Paderborn umfassen sowohl die Entwicklung effizienter eingebauter Diagnoseverfahren als auch spezielle Testverfahren für fehlertolerante Schaltungen und Systeme. Die Grundideen und Herausforderungen sollen in den folgenden beiden Abschnitten exemplarisch für die „Online“ Reparatur von Speichern und für den Test sogenannter fehlersicherer Schaltungen erklärt werden.

Eingebaute Diagnose und Reparatur

Effiziente Diagnoseverfahren unterstützen nicht nur die aktive Redundanz, sie erleichtern auch die Systementwicklung („Debugging“) und die Optimierung der Fertigungstechnologie. Um die Diagnose zu beschleunigen und kostengünstig durchführen zu können, muss wie beim Test versucht werden, eine geeignete Infrastruktur dafür bereits ins System zu integrieren. Übliche Ansätze für den eingebetteten Test liefern allerdings nur den Startpunkt dazu, da sie in der Regel darauf ausgelegt sind, Fehler zu erkennen. Eine genaue Fehlerlokalisierung erfordert an vielen Stellen mehr Detailinformationen.

Das Grundprinzip eingebauter Diagnose und Reparatur lässt sich am einfachsten für Speicherfelder erklären. Da Speicherchips bzw. Speicherfelder in SoCs sehr fehleranfällig sind, wird heute schon bei der Produktion von Speicherchips neben der eigentlichen Speichermatrix Redundanz in Form von zusätzlichen Zeilen und Spalten vorgesehen. Durch einen Rekonfigurationsmechanismus lassen sich Zeilen oder Spalten aus der Speichermatrix durch Reservezeilen oder -spalten ersetzen (Abbildung 7a). Im Fertigungstest wird der Speicher mit bestimmten Bitmustern initialisiert und dann immer wieder durchlaufen, wobei die Einträge gelesen und neu geschrieben werden. Wird z. B. der gesamte Speicher mit Null initialisiert und im ersten Durchgang jeder gelesene Eintrag invertiert (d. h. Null auf Eins abgebildet und umgekehrt), dann sollten danach an allen Speicherstellen Einsen stehen. Wird im zweiten Durchgang an einer Speicherstelle eine Null gelesen, ist dies ein Hinweis darauf, dass diese Speicherstelle defekt ist. So wird nach und nach eine Liste aller defekten Speicherstellen erzeugt („Failure-Bitmap“).

Diese Liste wird nach dem Test auf einem externen Rechner analysiert. Mit einem speziellen Optimierungsprogramm wird

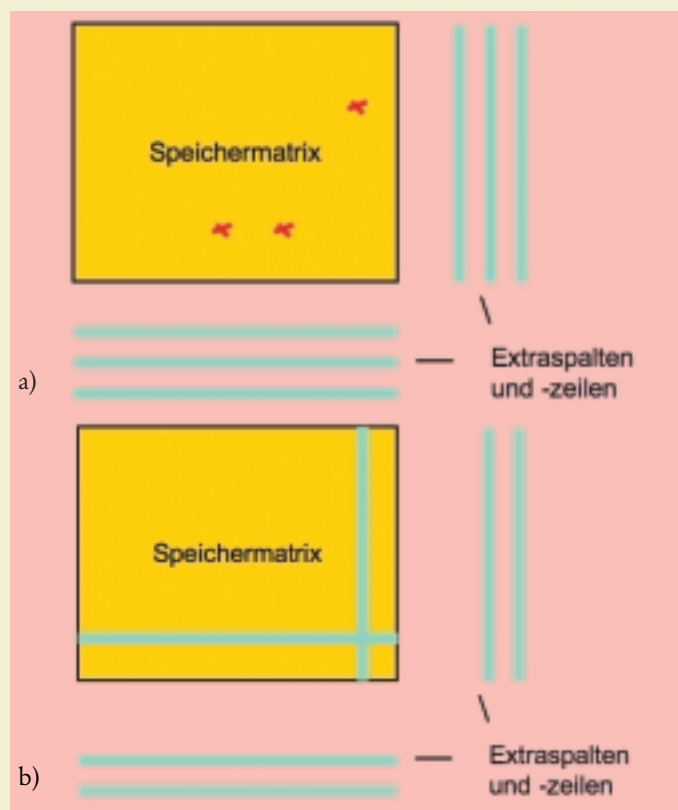


Abb. 7: Reparierbarer Speicher – (a) Speichermatrix mit Fehlern – (b) reparierter Speicher.

die bestmögliche Reparatur bestimmt und anschließend durchgeführt. Im Beispiel aus Abbildung 7a zeigt die Fehlerliste drei Fehler, für die es verschiedene Reparaturmöglichkeiten gibt. Eine Möglichkeit wäre, alle Spalten mit Fehlern durch Reservespalten zu ersetzen. Damit wären aber alle Reservespalten aufgebraucht und nur noch drei Reservezeilen stünden für weitere Reparaturen zur Verfügung. Da zwei der Fehler in der gleichen Zeile liegen, lassen sie sich gleichzeitig mit nur einer Reservezeile beheben. Zusammen mit der Reservespalte oder -zeile für den dritten Fehler werden damit insgesamt nur zwei Reserveelemente für die Reparatur verbraucht. Die in Abbildung 7b gezeigte Reparatur garantiert außerdem eine ausgewogene Verteilung der verbleibenden Reparaturressourcen auf Zeilen und Spalten. Im Allgemeinen sind die Fehlerlisten jedoch sehr viel umfangreicher und die Bestimmung der optimalen Reparatur entspricht einem aufwändigen Überdeckungsproblem.

Um Reparaturen zu ermöglichen, wenn das System schon im Einsatz ist, müssen sowohl der Speichertest als auch die Reparaturanalyse in den Chip eingebaut werden. Da die meisten Speichertests sehr regulär aufgebaut sind, lassen sie sich leicht als Selbsttest implementieren. Für die eingebaute Reparaturanalyse gibt es ebenfalls bereits einige Ansätze. Diese arbeiten aber entweder mit sehr einfachen Heuristiken und nutzen die Reparaturressourcen nicht optimal aus oder sie sind mit einem sehr großen Hardwareaufwand verbunden.

In Paderborn wird derzeit ein Verfahren entwickelt, das Test und Reparaturanalyse nicht unabhängig voneinander ausführt sondern miteinander kombiniert. Treten während des Tests neue Fehler auf, werden sofort die Konsequenzen für die Reparatur abgeschätzt. Dadurch wird die aufwändige Speicherung von Fehlerlisten reduziert.

Test fehlertoleranter Schaltungen und Systeme

Beim Test fehlertoleranter Schaltungen muss nicht nur geprüft werden, ob das System das gewünschte Verhalten liefert, sondern auch in welchem Maß dazu bereits Fehlertoleranz eingesetzt wird und wie robust das System noch gegenüber Störungen während des Betriebs ist. Bei reparierbaren Speichern wird die Qualität bereits heute daran gemessen, ob schon Reparaturen durchgeführt werden mussten. Bei anderen Bausteinen gibt es jedoch keine so naheliegenden Kriterien, die verbleibende Robustheit zu bewerten.

Klassische Fehlertoleranztechniken, wie etwa die n-fach modulare Redundanz, sind mit sehr hohen Kosten verbunden und werden meist nur für extrem sicherheitskritische Anwendungen eingesetzt. Für das große Spektrum anderer Anwendungen sind kostengünstigere Überwachungsstrategien, die im Fehlerfall eine Neuberechnung anstoßen, von besonderem Interesse. Die speziellen Aspekte und Herausforderungen beim Test solcher „selbstprüfender“ Schaltungen („self-checking circuits“) werden im Folgenden exemplarisch für „stark fehlersichere“ Schaltungen aufgezeigt.

Um eine Schaltung als selbstprüfende Schaltung zu implementieren, kodiert man die Ein- und Ausgaben als Elemente von fehlererkennenden Codes und überprüft die Ausgaben mithilfe eines entsprechenden Checkers (Abbildung 8) [4]. In der Praxis werden dafür häufig Paritätscodes oder ungeordnete Codes eingesetzt. Ein Beispiel für ungeordnete Codes sind Berger

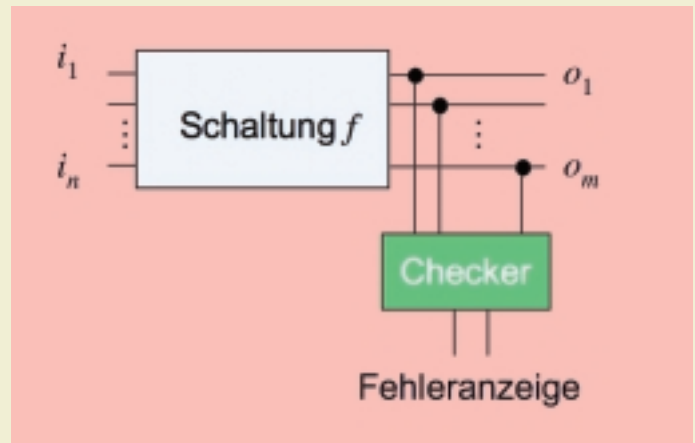


Abb. 8: Selbstprüfende Schaltung („self-checking circuit“).

Informationswort	Prüfwort	Kommentar
0110101	100 (4)	fehlerfreie Ausgabe
0110100	100 (4)	Fehler wird erkannt
0110000	100 (4)	Fehler wird erkannt
0011101	100 (4)	Fehler wird nicht erkannt

Abb. 9: Berger Code und Fehlererkennung.

Codes, die jedem Informationswort die Zahl der Einsen als Prüfwort hinzufügen und im Folgenden zur Illustration dienen sollen. Eine selbstprüfende Schaltung mit Berger Code Checker berechnet neben der gewünschten Ausgabe (Informationswort) auch die zu erwartende Zahl der Einsen (Prüfwort). Der Checker zählt die Anzahl der Einsen im Informationswort und vergleicht das Ergebnis mit dem Prüfwort.

Wenn die beiden Werte nicht übereinstimmen, muss auf jeden Fall ein Fehler in der Schaltung vorliegen. Wenn die beiden Werte übereinstimmen, wird das Ergebnis als richtig akzeptiert. Dabei kann jedoch ein Fehler übersehen werden, der die Anzahl der Einsen nicht verändert (Abbildung 9).

Um diesen Fall auszuschließen, müssen spezielle Entwurfsregeln für einen „fehlersicheren“ Entwurf eingehalten werden. Diese sorgen dafür, dass Fehler in der Schaltung die Ausgänge nur in eine Richtung kippen können (also nur Nullen in Einsen verfälschen oder umgekehrt). Damit ist sichergestellt, dass die Schaltung entweder das korrekte Ergebnis liefert oder die Zahl der Einsen verändert. Bei „stark fehlersicheren“ Schaltungen wird außerdem garantiert, dass es für jeden Fehler eine Eingangsbelegung gibt, die zu einer abweichenden Zahl von Einsen führt. So wird insgesamt das so genannte „Totally Self-Checking Goal“ erreicht, jeden Fehler dann zu erkennen, wenn er zum ersten Mal ein falsches Ergebnis liefert.

Die Entwurfsregeln für stark fehlersichere Schaltungen zielen auf transiente Fehler während des Betriebs ab. Bei der Fertigung können unter Umständen völlig andere Fehler auftreten. Da im Fertigungstest auch bewertet werden soll, wie robust die Schaltung noch während des Betriebs ist, muss insbesondere die Wechselwirkung zwischen Fertigungsfehlern und transienten Fehlern genau untersucht werden. Wenn es z. B. für Fertigungsfehler keine Testmuster gibt, wirken sie sich bei störungsfreiem Betrieb nicht aus, sie können jedoch die Wirkung von transienten Fehlern verändern und damit die Fehlersicherheit beeinträchtigen. Solche kritischen Fehler müssen identifiziert und mit gezielten Maßnahmen für den prüfgerechten Entwurf testbar gemacht werden.

Idealerweise wird in einer stark fehlersicheren Schaltung ein Fehler erkannt bevor der nächste Fehler auftritt. Wenn die Fehlerhäufigkeit zunimmt oder Testmuster für manche Fehler während des Betriebs nur sehr selten vorkommen, können sich jedoch Fehler akkumulieren und die Wirkungsweise späterer Fehler verändern. Starke Fehlersicherheit im bisherigen Sinn genügt dann nicht mehr, um die Zuverlässigkeit der Schaltung zu gewährleisten, und realistische Fehlerannahmen müssen besser als bisher berücksichtigt werden. Die zu erwartende Fehlerhäufigkeit bestimmt beispielsweise, welche Zeitspanne zwischen zwei Fehlern zu erwarten ist. Abhängig davon ist bei Fehlern, deren Erkennungswahrscheinlichkeit unter einer gewissen Schranke liegt, mit Akkumulation zu rechnen. Erst eine Analyse dieser besonders kritischen Fehler liefert Anhaltspunkte für speziell angepasste Teststrategien, sinnvolle Entwurfsmodifikationen und verbesserte Entwurfsregeln.

Kooperationen

Die Qualitätssicherung für nanoelektronische Schaltungen und Systeme steht auch im Mittelpunkt des DFG-Projekts Real-Test (Test and Reliability of Nano-Electronic Systems), das von den Universitäten Freiburg (Prof. Dr. Bernd Becker, Dr. Ilia Polian), Paderborn (Prof. Dr. Sybille Hellebrand) und Stuttgart (Prof. Dr. Hans-Joachim Wunderlich) sowie dem Fraunhofer IIS-EAS Dresden (Prof. Dr. Bernd Straube) gemeinsam durchgeführt und von den Firmen Infineon Technologies München und NXP Semiconductors Hamburg unterstützt wird [1]. Die eng verzahnten Forschungsschwerpunkte liegen dabei in den Bereichen:

- Fehlermodellierung (Dresden),
- Speicher- und Zustandsüberwachung für komplexe Systeme (Stuttgart),
- Test fehlertoleranter nanoelektronischer Systeme (Paderborn),
- Modellierung, Verifikation und Test akzeptablen Verhaltens (Freiburg).

Aktuelle Arbeiten zur eingebauten Diagnose und Reparaturanalyse laufen ebenfalls im Rahmen eines gemeinsamen DFG Projekts in enger Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart.

Literatur

- [1] B. Becker, S. Hellebrand, I. Polian, B. Straube, H.-J. Wunderlich, „DFG Projekt RealTest – Test und Zuverlässigkeit nanoelektronischer Systeme“, it – Information Technology, Vol. 48, No. 5, October 2006.
- [2] M. L. Bushnell, V. D. Agrawal, „Essentials of Electronic Testing“, Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [3] S. Hellebrand, J. Rajske, S. Tarnick, S. Venkataraman, and B. Courtois, „Built-in Test for Circuits with Scan Based on Reseeding of Multiple-Polynomial Linear Feedback Shift Registers“, IEEE Transactions on Computers, Vol. 44, No. 2, pp. 223-233, February 1995.
- [4] P. K. Lala, "Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design", San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [5] SIA, "International technology roadmap for semiconductors", Technical report, Semiconductor Industry Association, 2003, available at: <http://public.itrs.net/>
- [6] S. K. Shukla, R. I. Bahar (Eds.), „Nano, Quantum and Molecular Computing – Implications to High Level Design and Validation“, Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.

Kontakt: Prof. Dr. rer. nat. Sybille Hellebrand

Tel.: 05251/60 3002

E-Mail: sybille.hellebrand@date.upb.de

Chaos in der Quantenmechanik

Quantisierung chaotischer Systeme

Prof. Dr. rer. nat. Joachim Hilgert, Dr. rer. nat. Florian Rilke

Bei der Untersuchung von quantenphysikalischen Systemen legen Experimente und numerische Simulationen nahe, dass sich quantenmechanische Analoga von chaotischen Systemen der klassischen Mechanik qualitativ anders verhalten als jene von nichtchaotischen Systemen. Unterschiede findet man zum Beispiel bei den Wahrscheinlichkeiten für die Koexistenz von Zuständen mit nahezu gleicher Energie. Bisher hat man dafür aus der mathematischen Modellierung heraus keine Erklärung. Es fehlt sogar eine mathematisch sinnvolle Definition von Chaos für quantenmechanische Systeme. In diesem Aufsatz wird die Problematik bei der Modellbildung für das Chaos in der Quantenmechanik erläutert und ein neuer Forschungsansatz beschrieben, der auf chaotischen klassisch mechanischen Systemen mit starken Symmetrieeigenschaften beruht.

Mathematische Modellbildung von klassischer Mechanik und Quantenmechanik

Beschreibungen physikalischer und anderer Phänomene durch mathematische Gleichungen sind nicht Abbild der Wirklichkeit, sondern Modelle für sie. Ihre Berechtigung ziehen mathematische Modelle aus ihrer prognostischen Kraft. Das bedeutet, dass sich aus der Kenntnis der in das Modell einfließenden messbaren Größen verifizierbare Voraussagen über das zukünftige Verhalten solcher Größen formulieren lassen.

Ein typisches Beispiel für eine solche Modellbildung ist die klassische Newtonsche Mechanik, die Bewegung von Massen (z. B.

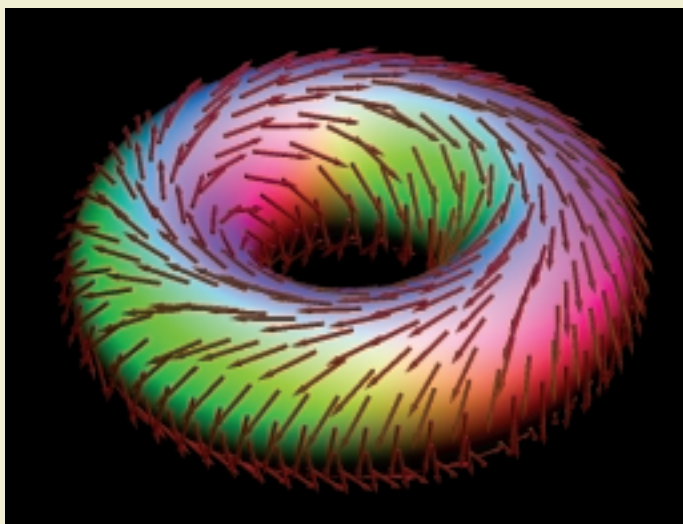


Abb. 1: Eine Differentialgleichung auf einer Mannigfaltigkeit ist durch ein Feld von Tangentialvektoren gegeben. Eine Lösung ist eine Kurve, deren Tangente an jedem Punkt der entsprechende Vektor aus dem Feld ist.



Prof. Dr. rer. nat. Joachim Hilgert
(Promotion 1982, Tulane Univ., New Orleans) ist Mathematiker und seit 2004 an der Universität Paderborn. Sein Arbeitsgebiet ist die Geometrie und Analysis von Symmetrien. Dabei bearbeitet er oft Fragestellungen mit einem engen Bezug

Planeten) modelliert. Dabei wird der physikalische Zustand eines Massepunktes durch seine Position und seinen Impuls, d. h. zwei Eingangsgrößen (in Form von Vektoren), beschrieben. Hat man mehrere Massepunkte, so nimmt man eine entsprechende Kollektion von Eingangsgrößen und beschreibt den Zustand des Systems durch diese als einen Punkt in einem hochdimensionalen Vektorraum.

Kommen noch äußere Zwangsbedingungen wie z. B. die Strippe eines Pendels, die die Bewegung der Pendelmasse einschränkt, dazu, so findet man als mögliche Aufenthaltsorte (den Zustandsraum) auch gekrümmte („nichtlineare“) Objekte wie z. B. eine Kugeloberfläche. Solche Objekte nennt man „Mannigfaltigkeiten“.

Newtons Gesetz „Kraft = Masse x Beschleunigung“ führt zusammen mit der Beschreibung der wirkenden Kräfte als Funktion von Ort und Impuls (z. B. der Gravitationskräfte in Abhängigkeit des Abstands oder Federkräfte in Abhängigkeit der Auslenkung) zu einer Gleichung, in der neben Ort und Impuls auch deren zeitliche Veränderung (Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) auftauchen. Eine solche Gleichung heißt Differentialgleichung. Die Mathematik stellt Resultate zur Verfügung, die sicherstellen, dass unter geeigneten Voraussetzungen eindeutig bestimmte Lösungen dieser Gleichungen existieren.

Diese Lösungen, die sich in der Regel nur approximativ bestimmen lassen, beschreiben die zeitliche Entwicklung des modellierten Systems. Auf dieser Basis kann man z. B. Planetenbahnen bestimmen und Sonnenfinsternisse vorhersagen.

Solche Modellbildungen haben immer einen begrenzten Gültigkeitsbereich. Im konkreten Fall der klassischen Mechanik bezieht sich dieser Bereich auf niedrige Geschwindigkeiten (sonst muss man relativistisch rechnen) und hinreichend große Längenskalen (sonst treten quantenmechanische Effekte auf). Außerhalb des Gültigkeitsbereichs ist das Modell mathematisch weiter sinnvoll,

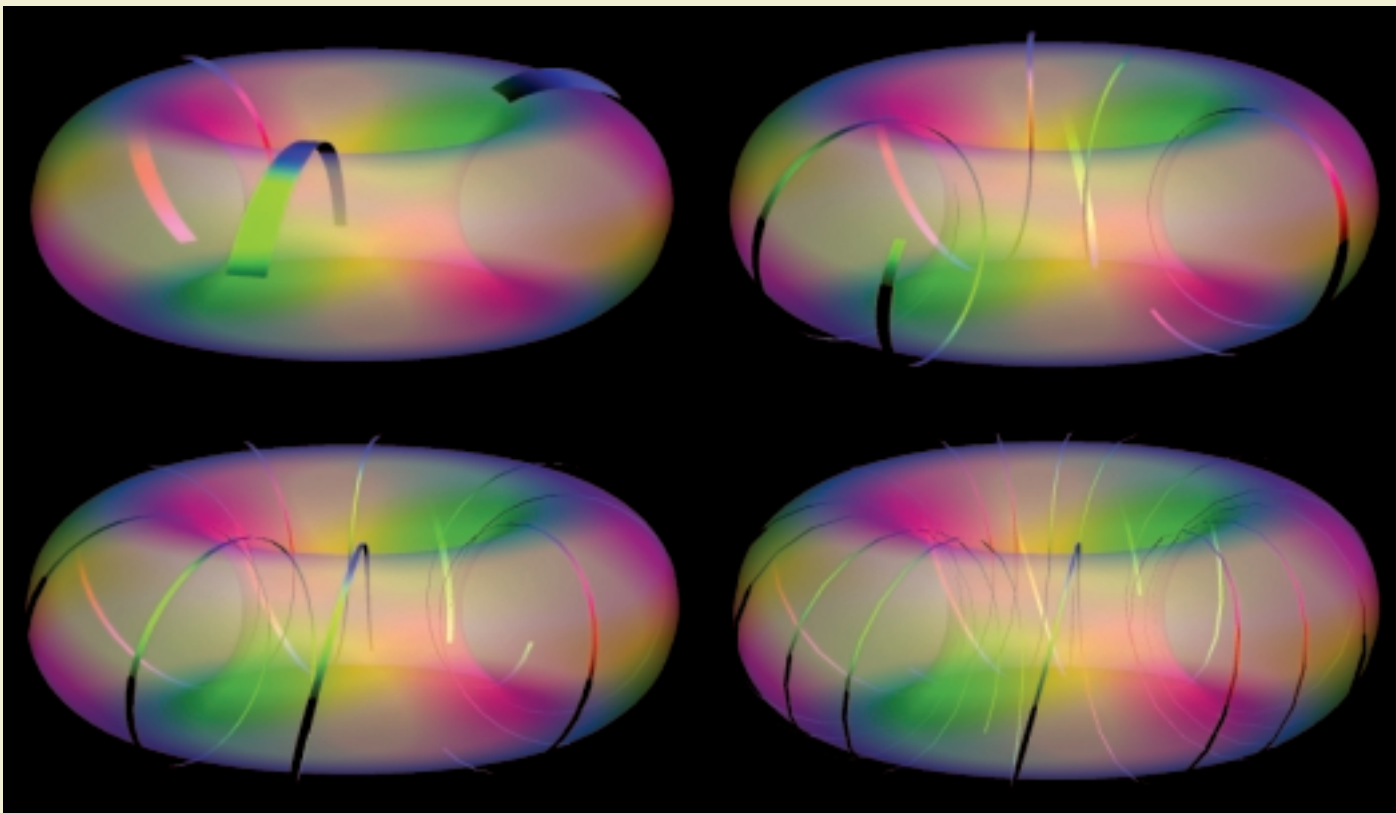


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung in hyperbolischen Systemen: In jedem Bild sieht man drei Entwicklungsstufen des ursprünglichen Flächenstücks. Je weiter die Zeit fortschreitet, desto schmaler und gleichzeitig länger wird das Flächenstück.

nicht aber die physikalischen Schlussfolgerungen, die man aus den Ergebnissen zieht.

Die mathematische Modellbildung der Quantenmechanik ist radikal verschieden von der Modellierung der klassischen Mechanik. Anstelle der endlich dimensional nichtlinearen Mannigfaltigkeiten (wie die erwähnte Kugeloberfläche bei einer pendelnden Masse) treten als Zustandsräume hier unendlich dimensionale Vektorräume auf, die keine sinnvolle grafische Entsprechung haben und so nicht bildlich vorstellbar sind.

Beobachtbare Größen sind nicht mehr Funktionen auf dem Zustandsraum, sondern „lineare Operatoren“, die man sich als Matrizen mit unendlich vielen Zeilen und Spalten vorstellen kann. Einer beobachtbaren Größe ist bei gegebenem Zustand kein einzelner Zahlenwert mehr zugeordnet, sondern eine ganze Familie von möglichen Zahlenwerten, die sich aus dem „Spektrum“ (den ins Unendlichdimensionale erweiterten Eigenwerten) der Matrix ergeben.

Der Name „Spektrum“ leitet sich anschaulich von der quantenmechanischen Beschreibung eines Atoms her: Gebundene Elektronen bewegen sich auf gewissen Schalen, die unterschiedliche Energieniveaus haben. Durch Anregung von außen kann man Elektronen auf höhere Energieschalen heben. Wenn diese wieder auf ihre ursprüngliche Schale zurückfallen, strahlen sie Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Die Frequenz dieser Wellen ist proportional zur Energiedifferenz der beiden Schalen. Die Messung des Frequenzspektrums (Spektralanalyse) der elektromagnetischen Strahlung eines Atoms liefert so die Struktur der möglichen Energieniveaus und ermöglicht damit die Identifikation von Elementen.

Regt man ein Elektron sehr stark an, dann wird es aus dem Atom herausgelöst und bewegt sich als freies Elektron, das kontinuierlich beschleunigt werden kann und damit auch kontinuierliche Energiewerte haben kann. Dieses Verhalten findet man oft

bei Spektren von linearen Operatoren: Es gibt sowohl einen diskreten als auch einen kontinuierlichen Anteil.

Die Tatsache, dass einer Beobachtungsgröße bei gegebenem Zustand kein einzelner Zahlenwert zugeordnet werden kann, lässt eine wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation zu. Die Bewegungsgleichungen sind in diesem Rahmen nicht wie in der klassischen Mechanik (potenziell nichtlineare) Differentialgleichungen, sondern lineare Gleichungen in einem unendlichdimensionalen Kontext.

Ebenso wie im Falle der klassischen Mechanik liefert die Mathematik Existenz und Eindeigkeitsätze für Lösungen solcher Bewegungsgleichungen. Die zeitliche Entwicklung der Zustände in Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen liefert in beiden Modellen „dynamische Systeme“.

Quantisierung und Dequantisierung

Ziel der mathematischen Modellbildung ist ein möglichst großer Gültigkeitsbereich. Man geht davon aus, dass die Quantenmechanik im Prinzip die klassische Mechanik enthält und letztere durch eine Grenzwertbildung bezüglich gewisser Parameter (z. B. der Planckschen Konstante) aus ersterer hervorgeht. Diesen Übergang aus der Quantenmechanik auf die klassische Mechanik nennt man „Dequantisierung“.

Umgekehrt erwartet man nicht, dass man jedem klassischen System ein quantenmechanisches System eindeutig zuordnen kann. Dennoch hat man eine Reihe von solchen Zuordnungen konzipiert, die man „Quantisierungen“ nennt, und deren Resultate sich als erfolgreiche Modelle für in der Realität auftretende physikalische Systeme herausgestellt haben. Dies gilt z. B. für die Quantisierungen des Prototyps aller schwingenden Systeme, des „harmonischen Oszillators“. Sie liefern eine theoretische Erklärung des Periodensystems der Elemente.

Die Untersuchung von Quantisierungs- und Dequantisierungsverfahren hat jenseits der physikalischen Interpretation in der Mathematik ein neues Licht auf verschiedene Querverbindungen zwischen Differentialgeometrie (dem mathematischen Rahmen der klassischen Mechanik) und der Funktionalanalysis (dem mathematischen Rahmen der Quantenmechanik) geworfen und neue Zusammenhänge aufgedeckt.

Speziell für Systeme mit einem hohen Grad von Symmetrie (z. B. Translationsinvarianz der Bewegungsgleichungen – der Gleichheit physikalischer Gesetze an jedem Ort) schränken sich die Variationsmöglichkeiten stark ein und machen im Extremfall sogar kanonische Zuordnungen möglich.

Chaotisches Verhalten von dynamischen Systemen

Es gibt keine allgemein gebräuchliche Definition für chaotisches Verhalten von dynamischen Systemen. Ein gemeinsames Merkmal aller Definitionsansätze ist jedoch die hohe Sensitivität der zeitlichen Entwicklung gegenüber kleinen Abweichungen des Ausgangszustandes. Ein weiteres typisches Merkmal von einheitlich als chaotisch bezeichneten Systemen ist, dass sehr viele der möglichen Zustände im Laufe der Zeit wirklich erreicht werden. In den dynamischen Systemen der klassischen Mechanik ist so ein Verhalten eher die Regel als die Ausnahme. Es kann z. B. dadurch entstehen, dass die Bewegungsgleichungen in manchen Richtungen gegebene Objekte stauchen und in anderen Richtungen dehnen (man spricht dann von hyperbolischen Systemen). Eine andere viel betrachtete Klasse von Beispielen sind Billardsysteme auf Billardtischen mit gekrümmten Banden (z. B. von der Form eines Stadions).

Da die Bewegungsgleichungen der quantenmechanischen dynamischen Systeme prinzipiell linearen Charakter haben, sind Durchmischungsphänomene wie oben beschrieben nicht möglich. Man hat bis heute keine brauchbare Definition für chaotisches Verhalten eines quantenmechanischen dynamischen Systems gefunden. Gleichzeitig liefern physikalische Experimente und numerische Rechnungen starke Hinweise darauf, dass sich Quantensysteme, deren Dequantisierung chaotisch ist, qualitativ anders verhalten, als solche, deren analoges klassisches System sehr regulär ist. Typischerweise sind es die statistischen Eigenschaften des Spektrums des Energieoperators (d. h. des linearen Operators, der die beobachtbare Größe Energie modelliert), an denen man solche Unterschiede ablesen kann.

Geodätische Flüsse

Da eine mathematische Formulierung von „Chaos“ in quantenmechanischen Systemen fehlt, ist es bislang nicht möglich, die numerischen Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Vermutungen theoretisch zu erhärten. Schwerpunkt der gegenwärtigen Forschung ist die Untersuchung spezieller Familien von Quantensystemen und ihrer Dequantisierungen, die einerseits so reichhaltig sind, dass man durch Variation von Parametern zwischen chaotischen und regulären Beispielen wechseln kann, und andererseits so einfach, dass es möglich ist, das Verhalten von relevanten mathematischen Objekten beim Transfer zwischen klassischem und Quantenmodell präzise zu beschreiben.

Eine Klasse von dafür hervorragend geeigneten Beispielen sind Quantisierungen von geodätischen Flüssen auf bestimmten Flächen, die man „hyperbolisch“ nennt. Physikalisch entspricht

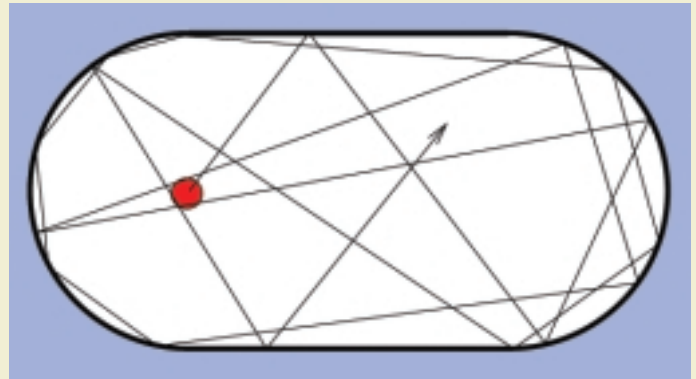


Abb. 3: Die Bahn der Kugel im Stadionbillard ist fast immer ein sehr unregelmäßiger Streckenzug.

dies der Bewegung von freien Teilchen auf Flächen mit „negativer Krümmung“ (d. h. um jeden Punkt herum sieht die Fläche wie ein Sattel aus).

Mathematisch gesehen handelt es sich hier im klassischen Kontext um Bewegungen entlang kürzester Verbindungen (im Falle einer Sphäre wären das Stücke von Großkreisen) und im quantenmechanischen Kontext um die Lösung von Wellengleichungen auf Flächen. Diese Familie von Beispielen zeichnet sich durch die Präsenz vieler Symmetrien aus, die sie einer präzisen mathematischen Analyse zugänglich machen.

Da sowohl die geometrische Beschreibung der Flächen als auch die Analysis der Wellengleichungen aufgrund zahlentheoretischer Motivationen oft untersuchte Probleme sind, kann man sie mit einer Vielzahl von mathematischen Werkzeugen behandeln. Insbesondere verfügt man über so genannte „Spurformeln“, die eine Brücke zwischen klassischer und quantenmechanischer Seite bilden.

Neue Ansätze

Ein neuer Ansatz, der Ideen aus Zahlentheorie, statistischer Mechanik und harmonischer Analyse aufgreift, führte zu einer neuartigen Korrespondenz (nach dem Entdecker, siehe [LZ01], Lewis-Korrespondenz genannt) zwischen klassischem und Quantensystem. Genauer gesagt lassen sich die Quantenzustände mit vorgegebener Energie durch bestimmte Objekte (genannt „Periodenfunktionen“) parametrisieren, die man mithilfe von Methoden der Thermodynamik aus dem klassischen dynamischen System herauslöst. Die Vorgehensweise ist etwas kompliziert: Zunächst konstruiert man aus dem klassischen dynamischen System eine Spin-Kette. Dies ist eine Art Perlenkette, für die jede Perle Farben aus einer vorgegebenen Farbpalette annehmen kann. Dazu hat man zusätzlich Regeln, welche Farben nebeneinander existieren können und welche nicht. Gibt es nur zwei Farben, lassen sich diese auch als „spin-up“ und „spin-down“ interpretieren, die den Namen Spin-Kette erklären. Die statistische Mechanik stellt für solche verallgemeinerte Spin-Ketten den so genannten „Thermodynamischen Formalismus“ bereit (siehe [Ru78]), der unter anderem einen „Transfer-Operator“ liefert. Die Periodenfunktionen findet man dann als Fixpunkte dieses Operators, d. h. die Punkte, die von dem Transfer-Operator unverändert gelassen werden.

Nachteil dieser ursprünglichen Lewis-Korrespondenz war, dass sie nur für ein einziges Beispiel, die „modulare Fläche“ vollständig bewiesen werden konnte. Für die Untersuchung des Chaosbegriffs in der Quantenmechanik sind jedoch, wie gesagt, Famili-

en von dynamischen Systemen nötig, um den Übergang von regulären zu chaotischen Bereichen betrachten zu können. Inzwischen gibt es verschiedene Verallgemeinerungen (vgl. [DH05, DH06]) der Lewis-Korrespondenz. Sie basieren auf einer „kohomologischen“ Interpretation der Periodenfunktionen, die hier nicht näher erläutert werden soll (Kohomologie ist ein Begriff aus der algebraischen Topologie). Auch über die Struktur des Raumes aller Periodenfunktionen hat man umfangreiche Informationen (vgl. [HMM05]). Damit ist man der genannten Zielsetzung, gut behandelbare Familien von Beispielen untersuchen zu können, ein Stück näher gekommen.

Ausblick

Schwierig bleibt allerdings die thermodynamische Interpretation. In den erwähnten Verallgemeinerungen konnten nur die den Periodenfunktionen zugeordneten Kohomologieräume verallgemeinert werden, nicht aber die zugrunde liegenden Spin-Ketten. Es ist daher wichtig, systematisch zu untersuchen, wie sich die ursprüngliche Konstruktion der Spin-Ketten für die modulare Fläche verallgemeinern lässt. Einen ersten Schritt in diese Richtung geht Florian Rilke im Rahmen seiner Dissertation an der UPB, wo er in Verallgemeinerung der Resultate von [HM02] Familien verallgemeinerter Spin-Ketten untersucht, deren thermodynamische Eigenschaften vollständig durch das Spektrum eines passenden Transfer-Operators beschrieben werden können.

Bei allen Fortschritten bleiben noch viele Fragen offen. Insbesondere ist es selbst im Falle der modularen Fläche noch immer nicht klar, ob die Lewis-Korrespondenz dazu benutzt werden

kann, einen direkten Zusammenhang zwischen den statistischen Eigenschaften des Spektrums und dem chaotischen Verhalten des zugrunde liegenden klassischen dynamischen Systems herzustellen.

Literatur

- [LZ01] Lewis, J.; Zagier, D.: Period Functions for Maass Wave Forms I. *Annals of Math.* 153 (2001), 191-258.
- [DH05] Deitmar, A.; Hilgert, J.: Cohomology of Arithmetic Groups with Infinite Dimensional Coefficient Spaces. *Documenta Math.* 10 (2005), 199-216.
- [DH06] Deitmar, A.; Hilgert, J.: The Lewis Correspondence for Submodular Groups. *Erscheint in Forum Math.*
- [G90] Gutzwiller, M.C.: *Chaos in Classical and Quantum Mechanics*, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [HM02] Hilgert, J.; Mayer, D.: Transfer Operators and Dynamical Zeta Functions for a Class of Lattice Spin Models. *Communications Math. Phys.* 232 (2002), 19-58.
- [HMM05] Hilgert, J.; Mayer, D.; Movasati, H.: Transfer Operators for $\Gamma_0(n)$ and the Hecke Operators for the Period Functions of $\mathrm{PSL}(2, \mathbb{Z})$. *Math. Proc. Cambridge Phil. Soc.* 139 (2005), 81-116.
- [HR07] Hilgert, J.; Rilke, F.: Meromorphic Continuation of Dynamical Zeta Functions via Transfer Operators. <http://arxiv.org/pdf/math.FA/0701097>
- [Ri06] Rilke, F.: *Transfer Operators and Zeta Functions for Spin Chains*. Dissertation, Univ. Paderborn, 2006.
- [Ru78] Ruelle, D.: *Thermodynamic Formalism*. Addison-Wesley, Reading, 1978.

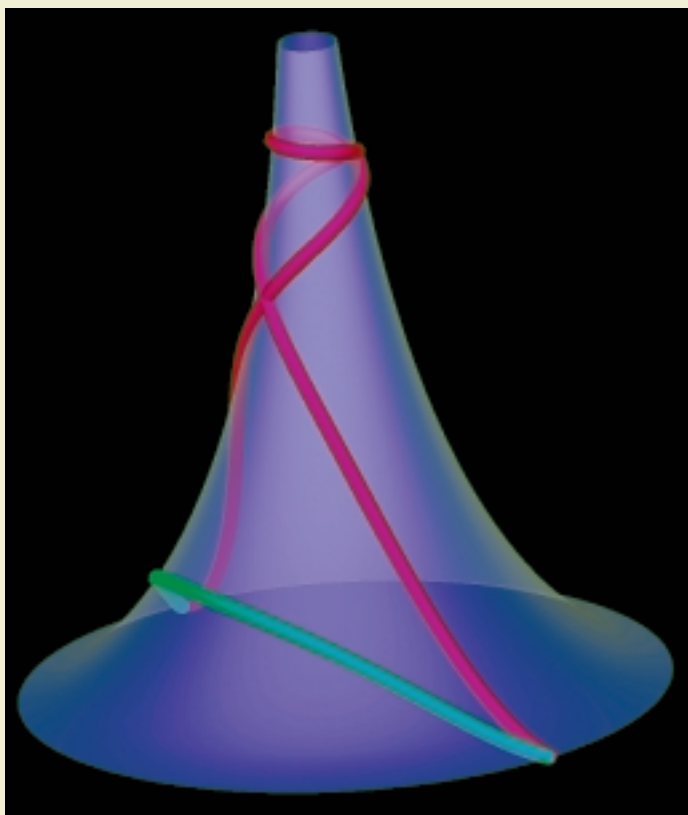


Abb. 4: Geodäten auf der „Pseudosphäre“. Die grüne Linie ist die kürzeste Verbindung zwischen den beiden Randpunkten. Die rote Linie ist nur „lokal“ eine kürzeste Verbindung, ähnlich wie nur eines der beiden Teilstücke eines Großkreises durch zwei Punkte auf einer Kugeloberfläche die kürzeste Verbindung zwischen den beiden Punkten ist.



Dr. rer. nat. Florian Rilke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Prof. Hilgert. Er hat gerade seine Dissertation über Spin-Ketten und ihre Transfer-Operatoren abgeschlossen.

Kontakt: Prof. Dr. rer. nat. Joachim Hilgert
 Tel.: 05251/60 2630
 E-Mail: hilgert@math.uni-paderborn.de

„Musterprozesse“ in der Medienentwicklung

Eine interdisziplinäre Sichtweise

Prof. Dr. phil. Bardo Herzig

Digitale Medien stellen heute einen integralen Bestandteil der Alltags- und Arbeitswelt dar. Vielerorts werden die Potenziale computerbasierter Medien für Lehren und Lernen hervorgehoben, ebenso wie mögliche Problemlagen und Gefahren nicht verschwiegen werden. So wundert es nicht, dass auch die Medienpädagogik eine didaktische und erzieherische Auseinandersetzung mit computerbasierten Medien als eines ihrer Aufgabenfelder versteht. Wie aber nähert sich eine pädagogische Disziplin einem zunächst technischen oder informatischen Gegenstand? Diese Frage ist ein wichtiger Bestandteil der Forschungen der Arbeitsgruppe Schul- und Medienpädagogik zur Fundierung einer interdisziplinären Medienbildungstheorie.

Ein gespanntes Verhältnis

Das Verhältnis zwischen den Disziplinen war lange Zeit von Misstrauen geprägt – fürchteten die Informatiker doch um die Verwässerung ihrer Inhalte durch die „Schmalfilmer“ und die Medienpädagogen um die Verkürzung von Medienkompetenz auf Anwendungsfertigkeiten oder technisches Detailwissen durch die „Technokraten“. Das argwöhnische Beäugen ist inzwischen einem sehr konstruktiven Dialog gewichen, der auch bildungspolitisch zu einem Gesamtkonzept zur informatischen Bildung an allgemeinbildenden Schulen geführt hat (vgl. GI 2000).

Aus der Sicht einer zeitgemäßen Medienbildung geht es – mit Bezug auf die Informatik – darum, mediale Eigenschaften des Computers in ihrer kulturellen Bedeutung zu reflektieren und zu verstehen, inwieweit technische Artefakte das Verhältnis des Menschen zu seiner sachlichen und personellen Umwelt und zu sich selbst beeinflussen. Am Beispiel der besonderen Eigenschaft von Computern Daten zu verarbeiten, wird in diesem Beitrag eine interdisziplinäre Sichtweise skizziert. Als *tertium comparationis* dient dabei die Semiotik.

Medienangebote als Zeichen

In vielen Mediendefinitionen wird der vermittelnde Charakter von Medien betont: Etwas wird mittels eines Mediums in den Wahrnehmungshorizont eines Menschen gebracht. Geht man von den Medienangeboten – etwa einem Foto, einem Fernsehbild oder einer Zeitungsseite – aus, so können Medienangebote auch als Zeichen betrachtet werden, denen der Nutzer bzw. Rezipient (auf der Basis individueller Kenntnisse und Erfahrungen) Bedeutung zuweist. Solche Zeichen werden mit Hilfe von Technik präsentiert, arrangiert, übertragen, gespeichert, vervielfältigt und verarbeitet.



Prof. Dr. phil. Bardo Herzig ist Professor für Erziehungswissenschaft. Seine Arbeits- und Forschungsgebiete umfassen die Allgemeine Didaktik, die Schul- und Medienpädagogik sowie die empirische Lehr- und Lernforschung.

Der Zeichencharakter von Medienangeboten lässt sich mithilfe des Ansatzes von Charles Sanders Peirce beschreiben, der Zeichen als triadische Relation zwischen einem Repräsentamen, einem Objekt und einem Interpretanten auffasst (vgl. 1966, 2.228). Am Beispiel eines Gemäldes von René Magritte ist die triadische Relation in Abbildung 1 verdeutlicht.

Das Repräsentamen entspricht dem Farbauftrag auf der Leinwand; es verweist auf ein Objekt, einen Apfel, und führt beim Betrachter (dem Interpretanten) zu einer entsprechenden Vorstellung eines Apfels als Naturprodukt oder Frucht, dem so genannten Interpretanten. Im Zeichenmodell von Peirce ist also unterstellt, dass das Wahrgenommene erst dann zum Zeichen wird, wenn es von einem interpretierenden Bewusstsein als solches erkannt und gedeutet wird.

Im Falle des Apfel-Gemäldes besteht eine Ähnlichkeit zwischen dem Repräsentamen und dem Objekt, auf das verwiesen werden soll. Ein solches Zeichen nennt Peirce Ikon (Abbildung 1). Wenn die Beziehung zwischen Repräsentamen und Objekt nur aufgrund der Kenntnis von Konventionen hergestellt werden kann, ist das Zeichen ein Symbol (z. B. die Sprache). Ein Index liegt dann vor, wenn zwischen dem Repräsentamen und dem Objekt eine ursächliche Verbindung besteht. Dies ist z. B. bei Rauch der Fall, der ursächlich in Verbindung mit dem Feuer steht, auf das er verweist.

Die semiotische Theorie ist geeignet, die Entwicklung der Medien als eine Entwicklung von Zeichenprozessen und ihrer technischen Artefakte zu beschreiben. Weil beim Zeichen streng genommen aber schon eine Interpretation des Zeichens mitgedacht ist, wird im weiteren Verlauf von Mustern gesprochen, die als Zeichen erkannt und entsprechend interpretiert werden können. Entsprechend wird im weiteren Verlauf die Medienentwicklung unter der Perspektive der Produktion, Registration, Übertragung und Verarbeitung von Mustern skizziert.

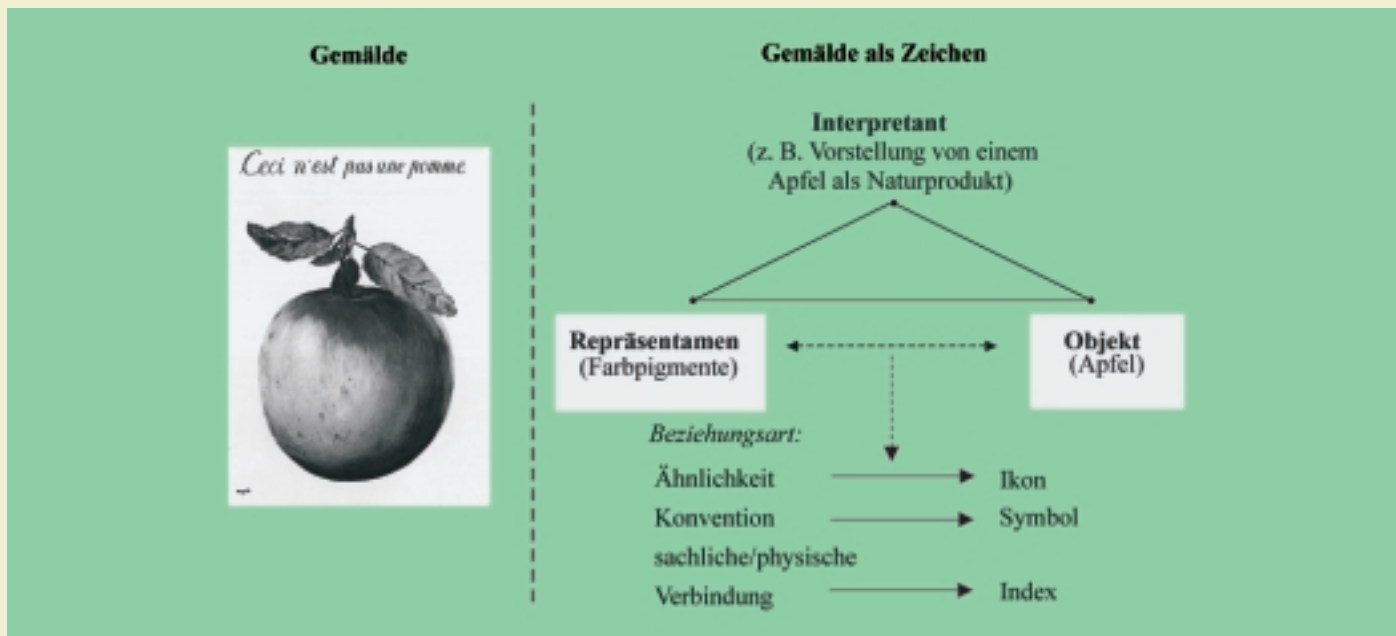


Abb. 1: Gemälde als Zeichen (links: René Magritte, „Dies ist kein Apfel“: Deklaration des Zeichencharakters von Abbildern (vgl. Doelker 2001, S. 168).

Produktionsprozesse

Eine der ersten Möglichkeiten, Wahrnehmungsinhalte festzuhalten und anderen zugänglich zu machen, war das Malen von (Ab-)Bildern. Semiotisch bedeutet dies die Schaffung von ikonischen Zeichen in einem produktiven (Zeichen-)Prozess. Solche medialen Produkte erlauben in der Regel auch eine entsprechende Vorstellungsbildung aufgrund der Ähnlichkeit des Objektes mit dem Wahrnehmungsgegenstand. Das erzeugte Muster ist ein Kontinuum aus Farbpigmenten, deren Anordnung durch den Wahrnehmungsgegenstand bestimmt wird, der in abbildhafter Weise vom Produzenten (z. B. dem Maler) rekonstruiert wird.

Mit der Schriftsprache entstand eine weitere Möglichkeit, Wahrnehmungsinhalte oder Gedanken festzuhalten und sie anderen zu vermitteln. Auch dieser Prozess kann produktiv genannt werden, greift allerdings auf sprachliche Konventionen in Form symbolischer Zeichen zurück. Das Besondere an diesen (Text-)Mustern ist, dass sie aus einer endlichen Anzahl von Elementen auf der Basis von Verknüpfungsregeln gebildet werden und damit einen gewissen Grad an Formalisierung aufweisen.

Mit der Erfindung des Buchdrucks ist es schließlich möglich, Textmuster mit frei beweglichen Lettern flexibel zu erzeugen, indem die einzelnen Elemente (Bleilettern) frei arrangiert werden. Das erzeugte Muster im Winkelhaken bzw. im Satzschiff (Abbildung 2) ist diskret und dient zur Herstellung eines Medienangebotes (i. d. F. eines Textes), das beliebig vervielfältigt und damit einer großen Anzahl von Rezipienten zur Verfügung gestellt werden kann.

Registrationsprozesse

Mit der Entwicklung der Fotografie wird eine Form der Erzeugung von Mustern möglich, die nicht mehr das Ergebnis eines kreativen Produktionsprozesses sind, sondern das Resultat einer direkten Aufzeichnung durch technische Geräte. Damit können Muster entstehen, die im Herstellungsprozess nicht mehr an die produktive Beteiligung des Bewusstseins (des Herstellenden) gebunden sind. So erstellt die analoge Fotografie als Registrationsprozess ikonische Zeichen, die einen indexikalischen Gehalt haben, weil die Bildpunkte auf dem Foto in ur-

sächlichem Zusammenhang mit dem vom originalen Objekt reflektierten Licht stehen (und damit die vermeintliche „Beweiskraft“ eines Fotos ausmachen). Das erzeugte Muster wird direkt in das Filmmaterial „eingeschrieben“ und anschließend chemisch umgewandelt. Der qualitative Entwicklungsfortschritt in der Fotografie besteht in der technischen Registrierung bzw. Konservierung von Umweltphänomenen als Zeichen.

Auch im auditiven Bereich können mithilfe einer Registrationsmaschine – z. B. einem Phonographen – Umweltphänomene festgehalten werden. Hierbei handelt es sich um eine Mustererzeugung als „direkte Einschreibung“ in ein bestimmtes Material, z. B. Stanniolfolie auf einer Phonographenwalze als Folge von Druckschwankungen (Abbildung 3). Da es sich wieder um einen Abbildungsprozess handelt, ist zur Interpretation keine besondere Kenntnis von Konventionen erforderlich, d. h. man erkennt z. B. eine aufgezeichnete Stimme aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit dem Original. Ein wesentlicher Unterschied zwischen einer Phonographenwalze oder einer Fotoplatte und dem Satzschiff besteht darin, dass das Muster im Satzschiff vor dem Druck jederzeit umgestaltet werden kann.



Abb. 2: Letternmuster im Winkelhaken.

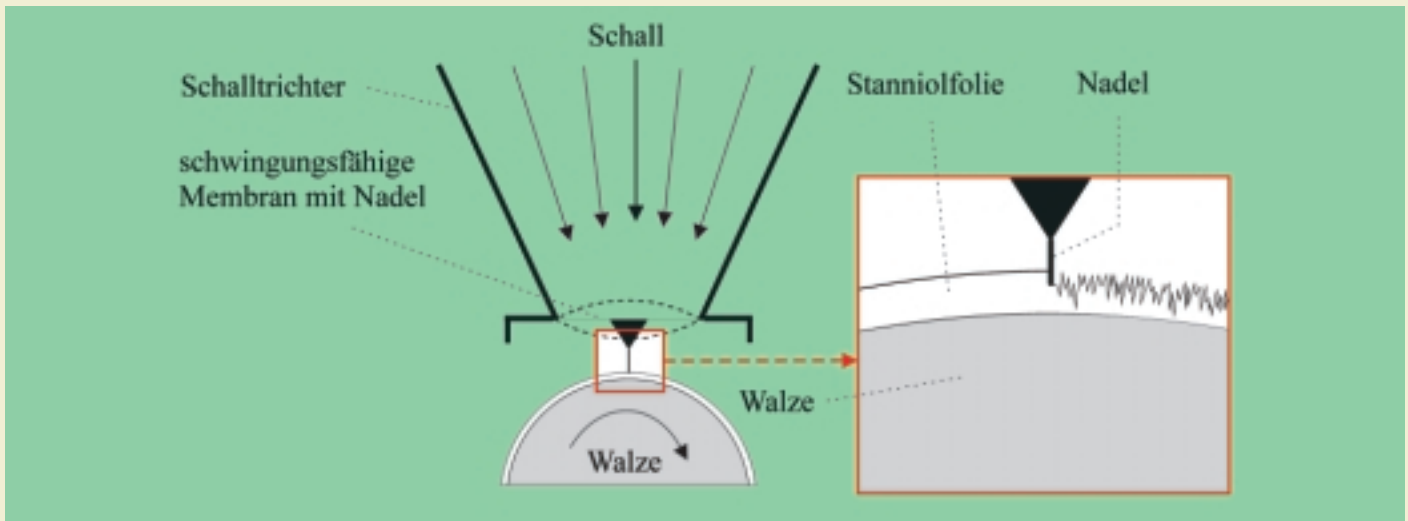


Abb. 3: Rillenmuster in einer Phonographenwalze.

Übertragungsprozesse

Die technische Erzeugung zeichenhafter Muster gewinnt mit der Erfindung der Morsetelegrafie wiederum eine neue Qualität. Mithilfe eines durch einen Elektromagneten gesteuerten Stiftes werden auf ein laufendes Papierband Striche und Punkte als Muster aufgebracht. Dieses Muster besteht nur noch aus zwei Elementen. Mit anderen Worten: Wer Morsezeichen entschlüsseln will, muss neben dem lateinischen Alphabet auch die Konventionen für Morsezeichen kennen. Das erzeugte Muster wird wieder eingeschrieben (in Papier), allerdings erst am Ort des Empfängers, d. h. das Muster wird zusätzlich technisch übertragen. Und noch etwas ist bedeutsam: Das in der Morsetelegrafie erzeugte Muster basiert auf zwei physikalischen Zuständen: langen und kurzen Spannungs- bzw. Stromimpulsen. Wandelt man die elektrischen Impulse in akustische Signale um, ist auch die Einschreibung in ein Material nicht mehr notwendiger Bestandteil des Musterprozesses. Radio und Fernsehen – als Weiterentwicklungen – sind solche flüchtigen Medien, bei denen die erzeugten Muster am Ort des Empfängers nur begrenzte Lebensdauer haben.

Verarbeitungsprozesse

Die bisher beschriebenen Muster, die mithilfe von analogen Techniken erzeugt werden, haben den Nachteil, dass sie nach ihrer Herstellung nicht mehr verändert werden können (ohne sie ggf. zu zerstören, z. B. beim Zerkratzen der Zylinderrolle im Phonographen). Um eine technische Verarbeitung – und damit auch eine nachträgliche Veränderung – von Mustern zu ermöglichen, müssen die bisher beschriebenen Prozesse zusammengeführt werden: Das Muster muss formalisiert werden, wie es beim Buchdruck mit dem zugrunde liegenden Alphabet angedeutet ist, und es muss physikalisch repräsentiert werden, wie es bei der Morsetelegrafie geschieht.

Eine wichtige Bedingung der Formalisierung ist die Interpretationsfreiheit. Der Buchstabe „A“ beispielsweise lässt sich sukzessive formalisieren (d. h. dekontextualisieren), indem man ihn zunächst in eine Zahl umwandelt (Bsp. ASCII-Code „65“), diese Zahl dann vom Dezimalsystem in das Binärsystem umwandelt („1000001“) und dies dann durch unterschiedliche Spannungsniveaus darstellt (z. B. 0 Volt, 5 Volt). Auf der Ebene der physikalischen Signale ist das Zeichen interpretationsfrei, d. h. die Spannungsniveaus können als „0“ und „1“ genauso interpretiert

werden wie als „Hut auf“ und „Hut ab“. Um auf den Buchstaben „A“ rückschließen zu können, müssen die Umwandlungsregeln bzw. -konventionen bekannt sein. Diese Kontextinformationen müssen ausgelagert werden, d. h. man muss sie z. B. in einem Regelwerk oder in einer Dokumentation festhalten.

Allein mit der technischen Realisierung in Form von Spannungsniveaus kann allerdings noch keine Verarbeitung stattfinden. Notwendig ist zusätzlich ein Regelwerk, das Operationen auf dem Binäralphabet definiert und ebenfalls technisch umgesetzt werden kann. Solche Regeln stellt die Aussagenlogik bereit, die Verknüpfungen zwischen den Zuständen „0“ (interpretiert als „falsch“) und „1“ (interpretiert als „wahr“) festlegt. Mithilfe elektronischer Bauteile können die elementaren Verknüpfungen „und“ und „oder“ umgesetzt werden, durch Kombination dieser Bauteile entsprechend komplexe Verknüpfungen bzw. Rechnungen. Abbildung 4 zeigt eine Schaltung aus verschiedenen Elementarbauteilen, die zwei einstellige Binärzahlen addieren kann (Halbaddierer). Je nach „Eingabe“ (d. h. angelegter oder nicht angelegter Spannung) erzeugt die Schaltung eine „Ausgabe“ (ebenfalls Spannungszustände), die als Additionsergebnis interpretiert werden kann.

Ein „Nachteil“ der Verarbeitung von Mustern z. B. in einem Halbaddierer liegt noch darin, dass die Eingabe und das „Programm“, also die Verarbeitungsvorschrift, nicht voneinander getrennt sind. Die Grundidee einer solchen Trennung ist bereits im Jacquard-Webstuhl realisiert, in dem das „Programm“ in Form von Lochkarten die Arbeitsfolge des Webstuhls steuert, wie es auch in den ersten funktionsfähigen Relaisrechnern noch der Fall war und beim von Neumann-Rechner dann zugunsten einer internen Programmspeicherung verändert wurde.

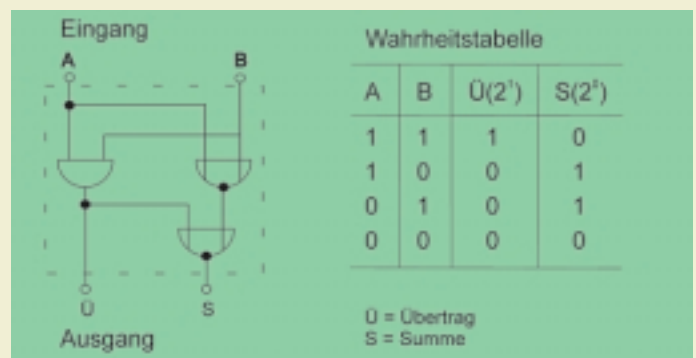


Abb. 4: Binäre Muster: Verarbeitung in einem Halbaddierer.

Software(-entwicklung) als Zeichen(-prozess)

Vor dem Hintergrund der bisherigen Überlegungen kann nun auch die Softwareentwicklung als ein Zeichenprozess verstanden werden, in dem – vereinfachend – folgende Phasen durchlaufen werden (Abbildung 5): In der Phase der Modellierung wird das Problem – z. B. die Berechnung der kürzesten Autobahnverbindung zwischen zwei Städten – aus der Alltagswelt mit allen relevanten Eigenschaften in eine symbolische und/oder ikonische Repräsentation transferiert. Dabei findet ein erster Reduktionsschritt statt, in dem alle für die Problemlösung irrelevanten Aspekte im Modell außer Acht gelassen werden – z. B. die Größe der Städte, die Beschaffenheit der Straßen usw. Die Rekonstruktion des Problems aus dem Modell ist dann nur über die Kenntnis von Zusatzinformationen möglich.

In der funktionalen Spezifikation wird mit einem endlichen Satz (schriftlicher) Symbole festgelegt, welche Bedingungen zu Beginn der Verarbeitung von Daten vorliegen sollen und welche zum Ende der Verarbeitung. Die funktionale Spezifikation erlaubt die präzise Vorhersage, was ein Programm berechnet. Sie ist allerdings stärker formalisiert als das Modell und damit auf weitere Kontextinformationen bei der Rekonstruktion durch einen Interpreten angewiesen. Das heißt, dass jemand, dem nur die funktionale Spezifikation vorliegt, in der Regel nicht erraten kann, welches Problem sich dahinter verbirgt.

In symbolischer Form wird ein Algorithmus formuliert, der die Manipulationen an den im Modell beschriebenen Objekten (den Mustern) in der Weise beschreibt, dass die in der funktionalen Spezifikation angegebenen Bedingungen erfüllt werden.

Mithilfe formaler (Programmier-)Sprachen wird der Algorithmus schließlich in einem endlichen Text codiert.

Für die beschriebenen Phasen gelten folgende Bedingungen:

- Auf dem Weg vom Problem zum lauffähigen Programm findet eine schrittweise Formalisierung statt, die auf der Ebene der Maschine zu interpretationsfreien, verarbeitbaren Mustern führt. Mit anderen Worten: Interpretationsfreiheit (und damit die Voraussetzung für maschinelle Verarbeitung) wird durch Formalisierung gewonnen.
- Im Verlaufe der Formalisierung werden Kontextinformationen „ausgelagert“, die rekonstruiert werden müssen, wenn formale Darstellungen interpretiert werden sollen. So ist beispielsweise die Kenntnis einer Programmiersprachensyntax notwendig, um aus dem Programmtext auf die entsprechenden Operationen schließen zu können. Darüber hinaus muss festgehalten sein, welche Variablen welche Objekte bezeichnen, welche Operationen auf diesen definiert sind usw.

Die Überlegungen zeigen, dass informatische Prozesse aus einer interdisziplinären Sichtweise auch als semiotische Prozesse dargestellt und verstanden werden können. Durch eine solche Betrachtung von Medien wird darüber hinaus deutlich, dass die

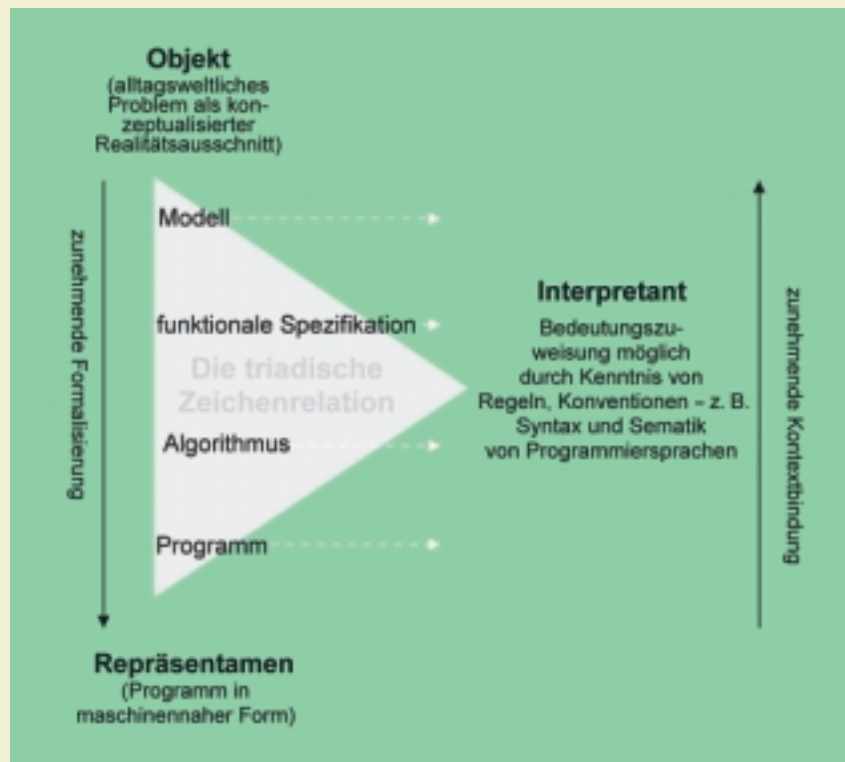


Abb. 5: Softwareerstellung als Zeichenprozess.

Digitalisierung quasi der Kulminationspunkt einer Entwicklung ist, die in einzelnen Medien bereits Vorläufer hat und auf der Basis semiotischer Überlegungen auch als eine konsistente Entwicklungslinie aufgezeigt werden kann. Aus einer (medien-)pädagogischen Perspektive ist es dabei weniger bedeutsam, wie die technischen Prozesse im Detail verlaufen, sondern die Phänomene auf der Basis von grundlegenden Prinzipien als solche zu verstehen. Einen Zugang dazu kann eben auch eine interdisziplinäre Sichtweise schaffen.

Auf der Basis solcher grundlegenden Prinzipien ist dann in weiteren Schritten die begründete Erarbeitung von medienpädagogischen Maßnahmen möglich.

Bildnachweis

Darstellung 2: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bleisatz,<01.01.2007>>

Literatur

- Doelker, Ch. (2001): Legere mundum – die Welt lesen. In: Herzig, B. (Hrsg.): Medien machen Schule. Klinkhardt: Bad Heilbrunn, S. 165-172.
- GI [Gesellschaft für Informatik] (2000): GI-Empfehlungen für ein Gesamtkonzept zur informatischen Bildung an allgemeinbildenden Schulen. LOG IN 20 (2000)2, Beilage.
- Peirce, C.S. (1966): Collected Papers of Charles Sanders Peirce. Hrsgg. v. Hartshorne, Ch./ Weiss, P., Vol. 1-6. Cambridge: Harvard University Press.
- Herzig, B. (2002): Analoge und digitale Medien im Bildungsprozess. Grundlagen und Anwendungen einer integrativen Medienbildung. Paderborn: Universität.

Kontakt: Prof. Dr. phil. Bardo Herzig

Tel.: 05251/60 3582

E-Mail: bardo.herzig@upb.de

Optische Technologien für die Informationsgesellschaft

Naturwissenschaftler und Ingenieure forschen gemeinsam am neuen Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn (CeOPP)

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hilleringmann, Prof. Dr. phil. Klaus Lischka, Prof. Dr. rer. nat. Heinz-S. Kitzerow

Forschung auf dem Gebiet der optischen und optoelektronischen Technologien erfordert heute das Zusammenwirken von mehreren Disziplinen, um im internationalen Wettstreit erfolgreich zu sein. Aus diesem Grund haben sich an der Universität Paderborn mehrere Gruppen aus der Fakultät für Naturwissenschaften und der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik zu einer wissenschaftlichen Einheit, dem Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn (CeOPP) zusammengeschlossen. In enger Kooperation von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren werden Grundlagen erforscht und neue Anwendungen erkundet. In der Lehre werden fachübergreifende Veranstaltungen angeboten und damit die Studierenden fit für die zukünftigen Herausforderungen der Informationstechnologie gemacht.

Optische Komponenten sind heute ein wesentlicher Bestandteil des täglichen Lebens. Ausgehend von der Lichtquelle mit gezielter Intensitätsverteilung und angenehmem Farbton über die Signal- und Überwachungstechniken bis hin zur optischen Datenübertragung unterstützt die Optik den Menschen sowohl im produzierenden Bereich als auch im Dienstleistungssektor. Optische Komponenten und die Kombination dieser Komponenten in Form von photonischen Schaltkreisen für die Datenübertragung werden jedoch noch stark an Bedeutung gewinnen. Die Verbindung von Elektronik und Optik – Optoelektronik – ist schließlich eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts.



Abb. 1: Ansicht des neuen Gebäudes für Optoelektronik, Integrierte Optik und Photonik.



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hilleringmann ist seit 1999 Professor für Sensorik im Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Paderborn. Er und seine Mitarbeiter beschäftigen sich mit organischer Elektronik, mit CMOS-Technologie, Nanoelektronik, integrierter Optik und Gas-Sensorik.



Prof. Dr. phil. Klaus Lischka ist seit 1994 Professor für experimentelle Halbleiterphysik. Sein Arbeitsgebiet umfasst das Wachstum von Halbleiternanostrukturen durch Molekularstrahlepitaxie, die In-situ-Charakterisierung von Halbleiterstrukturen während des Wachstums sowie die Herstellung von optoelektronischen Bauelementen.



Prof. Dr. rer. nat. Heinz-S. Kitzerow ist seit 1998 Professor für Physikalische Chemie an der Universität Paderborn. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit Flüssigkristallen und zusammengesetzten Materialien, die Flüssigkristalle enthalten, mit Leuchtdioden und Photovoltaik auf der Basis organischer Halbleiter, mit aktiven Photonischen Kristallen und dissipativen Strukturen.

Die verwendeten optischen Komponenten liegen in ihren Abmessungen häufig im Mikrometerbereich oder darunter, sodass zu ihrer Herstellung eine moderne Reinraumtechnik notwendig ist. Diese steht an der Universität Paderborn im neuen Gebäude für Optoelektronik, Integrierte Optik und Photonik (Abbildung 1) seit Beginn des Jahres 2006 zur Verfügung. Das neue Laborgebäude mit einem großzügig geplanten und ausgestatteten Reinraumbereich (Abbildung 2) sowie die gut funktionierende Zusammenarbeit der Gruppen aus den Departments Physik und Chemie und dem Institut für Elektrotechnik



Abb. 2: Gelblichtbereich des Reinraums im neuen Gebäude.

und Informationstechnik sowie Forschern aus dem In- und Ausland bilden hervorragende Voraussetzungen. Es soll u. a. auch als Kondensationskeim für öffentliche und industrielle Projekte wirken.

Um die interdisziplinäre Forschung im Bereich der optischen Technologien und der Mikrotechniken voranzutreiben, haben mehrere auf dem Gebiet der Optik forschende Arbeitsgruppen ein fakultätsübergreifendes Institut, das Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn (CeOPP), gegründet. Die verschiedenen, nachfolgend aufgeführten Projekte belegen schon jetzt die wissenschaftliche Exzellenz dieses Forschungszentrums.

Integrierte Optik

Die Integrierte Optik auf der Basis von Lithiumniobat ist seit Jahren ein Forschungsschwerpunkt an der Universität Paderborn. Unter der Führung von Prof. Wolfgang Sohler wurde hierzu eine Forschergruppe der DFG eingerichtet, der mehrere Gruppen des CeOPP angehören. Forschungsergebnisse, die vor allem bei der Industrie große Beachtung finden, werden in fruchtbarer Zusammenarbeit der beteiligten Gruppen erzielt. Auch in Zukunft wird dieses angewandte Forschungsthema am CeOPP, unterstützt von ausländischen Firmen, der DFG und der Europäischen Union, einen breiten Raum einnehmen.

Ein Beispiel für das erfolgreiche Wirken stellt die optische Datenübertragung mit 40 Gbit/s über eine Glasfaser von mehreren 100 Kilometer Länge dar [1]. Durch eine spezielle Signalaufbereitung können extrem kurzzeitige Lichtimpulse nach Durchlaufen der Glasfaser wieder rekonstruiert und mit Fotodioden erfasst werden. Prof. Reinhold Noés Ziel ist die weitere Steigerung der Rate auf 120 Gbit/s, um die immensen Datenmengen des weltweiten Netzes schnell und möglichst ohne Übertragungsfehler zu verteilen.

Unterstützung erhält er dabei von Prof. Sohler, Department Physik. Seine integrierten optischen Schaltungen (siehe z. B. Abbildung 3) erlauben u. a. die Erzeugung von extrem kurzzeitigen Lichtimpulsen aus einer Dauerlichtquelle, indem ein kleiner Chip aus Lithiumniobat periodisch den Lichtweg gezielt verändert. Zur Ansteuerung des Chips sind extrem schnelle Schaltungen erforderlich, die Prof. Andreas Thiede (EIM-E) in einer speziellen Schaltungstechnik entwickelt. Dabei wird Silizium-Germanium als Halbleitermaterial verwendet.

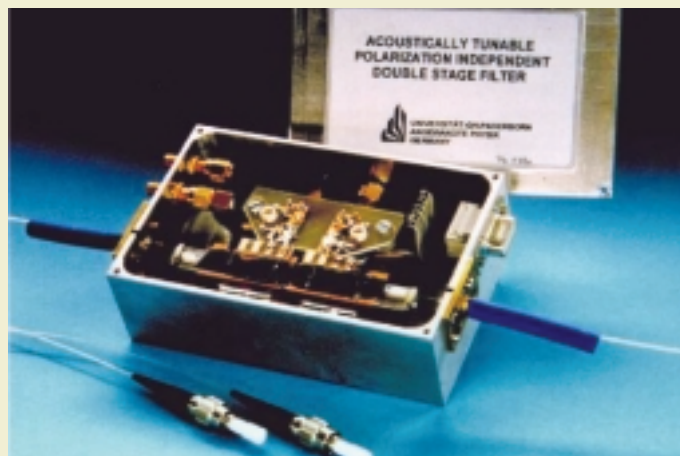


Abb. 3: An der Paderborner Universität entwickelt: Ein akusto-optischer Wellenlängenfilter auf der Basis von Lithiumniobat für den Einsatz in der optischen Nachrichtenübertragung [2].

Halbleiterphysik und Optoelektronik

Weitere Arbeiten erforschen neue Lichtquellen aus Verbindungshalbleitern wie Galliumnitrid [3]. Diese Lichtquellen der Zukunft versprechen eine hohe Energieeffizienz in Verbindung mit einer langen Lebensdauer der Strahlungsquelle. Die Gruppe von Prof. Klaus Lischka beschäftigt sich mit der Züchtung von Halbleitermaterialien, die aufgrund ihrer großen Energielücke besonders geeignet für die Herstellung von optischen und optoelektronischen Bauelementen für den blauen und ultravioletten Spektralbereich sind. Dabei hat die Gruppe der III-Nitride, Verbindungen von Elementen der dritten Gruppe des Perioden-

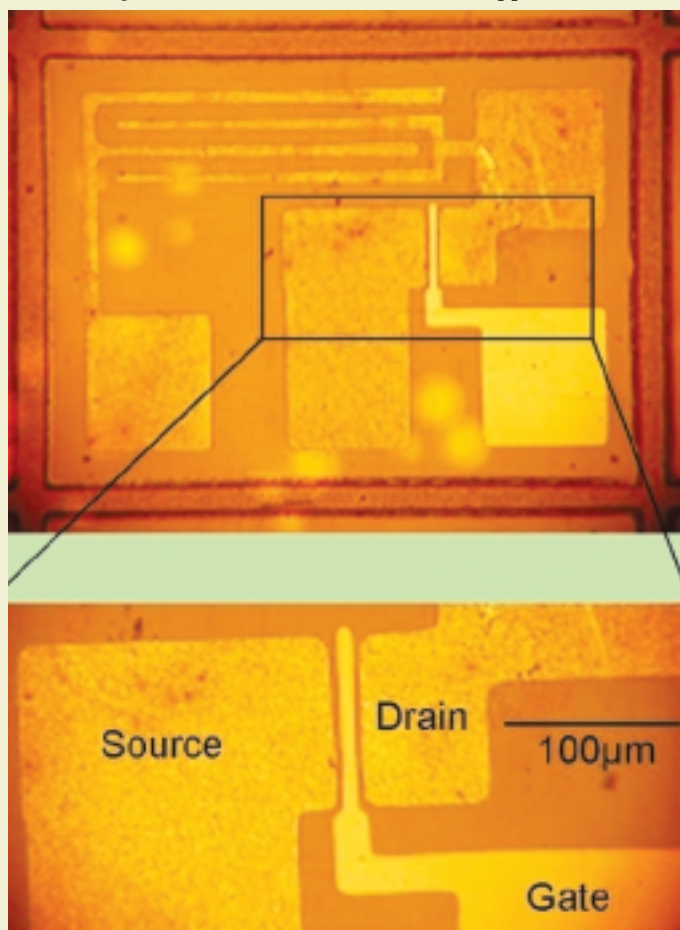


Abb. 4: Ein Ergebnis der gemeinsamen Anstrengungen von Physikern und Elektrotechnikern: Der weltweit erste Feldeffekttransistor auf der Basis von kubischen III-Nitriden [3].

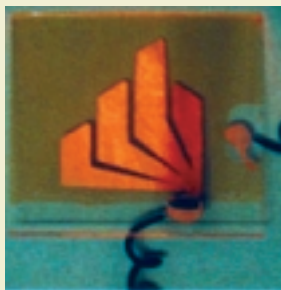


Abb. 5: Organische Leuchtdioden auf der Basis von Flüssigkristallen [5].

systems (Gallium, Indium, Aluminium) mit Stickstoff, eine dominierende Stellung. In Paderborn wird eine sehr schwer herzustellende Modifikation dieser Halbleiter gezüchtet, nämlich jene mit kubischer Kristallstruktur. Dabei hat die Paderborner Gruppe hervorragende Ergebnisse erzielt, die international mit Interesse beachtet werden. So hat vor etwa vier Jahren eine gut dotierte Zusammenarbeit mit einem japanischen Konzern mit dem Ziel begonnen, Bauelemente auf der Basis von Gruppe III-Nitriden herzustellen. Ein sichtbares Ergebnis ist der weltweit erste Feldeffekttransistor aus diesem Material (Abbildung 4). Besonders erfreulich ist, dass dieses elektronische Bauelement in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Ulrich Hilleringmann realisiert wurde, die ebenfalls dem CeOPP angehört.

Die Anwendungen einer anderen Gruppe von Halbleitern und Halbleiter-Nanostrukturen, die ebenfalls am CeOPP hergestellt werden, liegt hingegen noch weit in der Zukunft. In enger Kooperation mit einer international führenden Gruppe an der Stanford University (USA) werden in Paderborn Halbleiter-Nanostrukturen hergestellt, die als Lichtquellen für die Datenübertragung mittels Quanten-Teleportation eingesetzt werden sollen. An einer großen Zahl von Forschungsinstituten weltweit werden derzeit die Grundlagen für die Informationsübertragung und -verarbeitung auf der Basis der Quantenmechanik erforscht. Drei Gruppen am CeOPP sind auf diesem Gebiet aktiv. Aufgrund der bisher hervorragenden Ergebnisse – als Beispiel kann hier die Arbeit von Prof. Artur Zrenner über Einzelquantenpunkt-Photodioden, veröffentlicht in der renommierten Zeitschrift „Nature“, genannt werden – ist zu erwarten, dass diese Aktivitäten in Zukunft noch deutlich ausgebaut werden [4].

Alternativ werden organische Halbleiterdioden als Lichtquelle für kostengünstige Displays entwickelt (Prof. Kitzerow) [5]. Die verwendeten Materialien bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen, die bei elektrischer Anregung Licht ausstrahlen (Abbildung 5). Andere organische Halbleitermaterialien eignen sich zur Herstellung integrierter Schaltungen (Prof. Hilleringmann) [5]. Diese so genannten „Low-cost/low performance“ Transistoren sind insbesondere für kurzlebige Massenprodukte wie elektronische Eintrittskarten oder zur Etikettierung von Einzelhandelsprodukten interessant. Weitere Arbeiten behandeln mikromechanisch hergestellte Spiegelfelder und photonische Kristalle. Sie sollen zur gezielten Steuerung von Licht in Wellenleitern eingesetzt werden.

Photonische Kristalle und Metamaterialien

Kristalle, die auf „natürliche“ Weise gezüchtet werden, haben wegen ihrer Zusammensetzung und Struktur ganz bestimmte physikalische Eigenschaften. Es ist ein visionärer Traum der Naturwissenschaft, Materialien mit bestimmten in der Natur nicht vorkommenden Eigenschaften herzustellen. Dieses Ziel wurde bei den „Photonischen Kristallen“ erreicht, bei der die optische Transparenz durch den Herstellungsprozess beeinflusst

wird. Photonische Kristalle werden am CeOPP in Zusammenarbeit von Physik (Prof. Wehrspohn) und Chemie (Prof. Huber, Prof. Kitzerow) erforscht [6]. Als Besonderheit versuchen die Paderborner Forscher Strukturen herzustellen, deren optische Eigenschaften auch noch von außen (z. B. durch Anlegen einer elektrischen Spannung) gesteuert werden können (Abbildung 6). Auf dieser Basis sollen aktive optische Bauelemente geschaffen werden.

Mit modernen Ätzverfahren können Photonische Kristalle – Strukturen, deren Herstellung eine Präzision von einem Millionstel Millimeter erfordert – aus dünnen Siliziumscheiben fabriziert werden. Derartige Nanostrukturen können aber auch von winzig kleinen Kugeln aus Siliziumdioxid oder aus Polymeren gebildet werden, die in der Lage sind, sich von selbst regelmäßig anzuordnen. Ein Beispiel aus der Natur ist der Edelstein Opal. Der künstlichen Herstellung ähnlicher Systeme mit maßgeschneiderten Eigenschaften widmet sich u. a. das Department Chemie.

Ein Ziel der modernen Forschung ist es, Nanostrukturen herzustellen, die so fein sind, dass ihre Details kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts. Damit ließen sich künstliche Materialien (Metamaterialien) herstellen mit optischen Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen, z. B. ein Material mit einem negativen Brechungsindex. Das Licht würde beim Eintritt in ein solches Material nicht in die Richtung abgelenkt werden, die wir im täglichen Leben beobachten, sondern gerade in die entgegengesetzte Richtung. Flache Linsen oder höchstauflösende optische

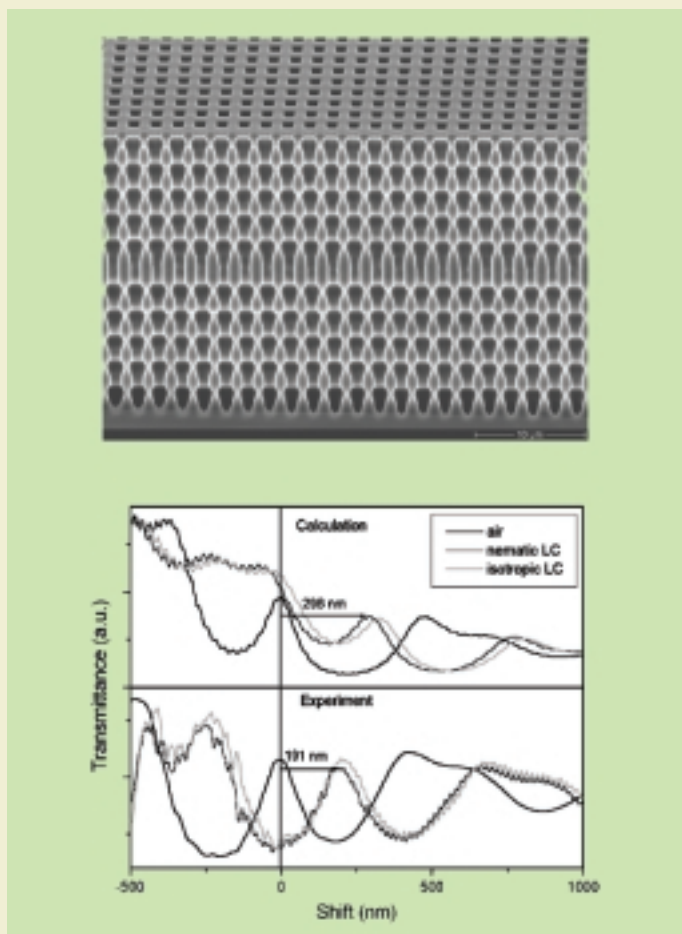


Abb. 6: Oben: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Siliziumwafers, der so geätzt wurde, dass ein dreidimensionaler Photonischer Kristall entsteht. Unten: IR-Transmissionsspektren und deren Veränderung beim Füllen der porösen Struktur mit einem Flüssigkristall [6].

Quelle: AG Schuhmann

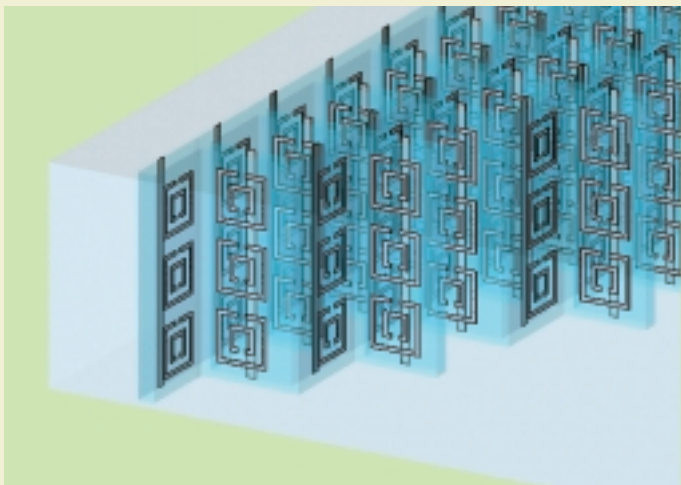


Abb. 7: Künstliches Material (Metamaterial), dessen Wechselwirkung mit Radiowellen nicht nur durch seine Atome und Moleküle bestimmt wird, sondern vor allem durch die elektromagnetische Resonanz von bestimmten Metallstrukturen, deren Abmessungen klein sind im Vergleich zur Wellenlänge der Radiowellen [7].

Quelle: AG Hillerigmann

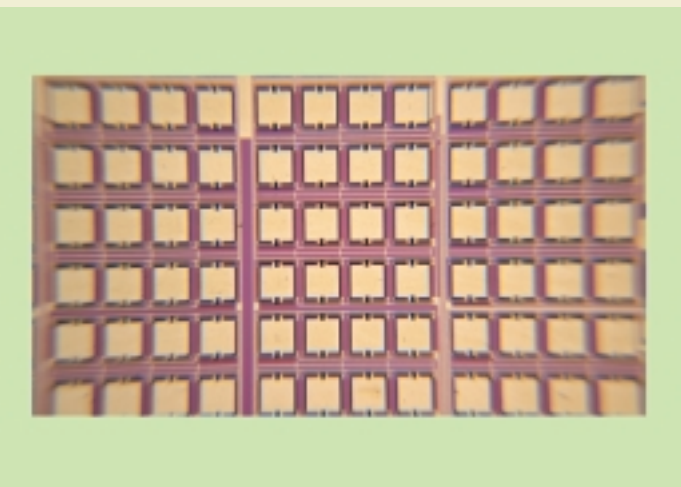


Abb. 8: Mikrospiegelfeld, bestehend aus 72 in zwei Raumrichtungen kippbaren Mikrospiegeln.

Projektionssysteme ließen sich damit bauen. Zumindest im Bereich der Radiowellen wurden die grundlegenden Effekte bereits auch experimentell nachgewiesen (Abbildung 7). Mit der Beschreibung und Vorhersage der Eigenschaften solcher Metamaterialien beschäftigt sich eine neue Arbeitsgruppe (Prof. Schuhmann) im Bereich der Theoretischen Elektrotechnik. Hier stellen sich auch neue Herausforderungen für die experimentellen Arbeiten am CeOPP.

Mikrospiegel und mikromechanische Komponenten

Durch gerichtet wirkende Ätzzvorgänge lassen sich im kristallinen Silizium bewegliche Stege, Zungen und Membranen herstellen (Prof. Hillerigmann). Als Antrieb für diese Elemente eignen sich elektrostatische Kräfte oder elektrothermische Aktoren, z. B. zur Auslenkung von kleinen Mikrospiegelflächen aus der Ruhelage zur gezielten Steuerung eines Laserstrahls in einer Scanner-Kasse (Abbildung 8).

Aktuelle Mikrospiegelfelder sind aufgrund ihrer nur wenige Mikrometer dicken Verankerungen den rauen Anforderungen im Kraftfahrzeug jedoch nicht gewachsen. Erschütterungen und Vibrationen führen sehr leicht zur Zerstörung der Aufhängungen. Hier bieten stabile Halterungen aus Silizium eine hohe

Robustheit, die einen Einsatz der Mikrospiegelfelder im Kfz-Scheinwerfer erlauben. In Verbindung mit der elektrothermischen Aktorik können Strahlablenkwinkel von über 20° erzielt werden, wie es das aktive Kurvenlicht heute erfordert.

Die aktuellen Forschungsarbeiten beinhalten u. a. die Integration einer Lagerrückmeldung in den Spiegel, um eine geregelte Ansteuerung der gewünschten Kippwinkel zu ermöglichen.

Der Schlüssel zum Erfolg:

interdisziplinäre Zusammenarbeit

Durch ihre Arbeiten schlagen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am CeOPP (Abbildung 9) einen Bogen von der reinen Grundlagenforschung zur angewandten Forschung, von der Materialwissenschaft hin zur industrienahen Bauelemententechnologie. Grundlagenforschung wird immer durch Individualisten erbracht. Durch den Zusammenschluss von Forscherpersönlichkeiten aus verschiedenen Fachbereichen am CeOPP entstehen aber synergetische Effekte, die gerade bei der praktischen Anwendung der Forschungsergebnisse sehr hilfreich sein werden.

Die Arbeiten im CeOPP werden von der DFG, dem BMBF sowie der VW-Stiftung gefördert. Kooperationen mit der Industrie zur Entwicklung neuartiger Bauelemente oder Systeme fordern die Mitarbeiter, innovative Ideen für zukunftsweisende Anwendungen zu finden.

Beteiligte Projektleiter

Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hillerigmann

Prof. Dr.-Ing. Gerd Mrozynski

Prof. Dr.-Ing. Reinhold Noé

Prof. Dr.-Ing. Rolf Schuhmann

Prof. Dr.-Ing. Andreas Thiede

Department Physik:

Prof. Dr. phil. Klaus Lischka

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Sohler

Prof. Dr. rer. nat. Artur Zrenner

Department Chemie:

Prof. Dr. rer. nat. Klaus Huber

Prof. Dr. rer. nat. Heinz-S. Kitzerow

Literatur

- [1] U. Rust und R. Noé: ForschungsForum Paderborn 1, 62 (1998). S. Hinz, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf, V. Mirvoda, R. Noé, G. Feise, H. Herrmann, R. Ricken, W. Sohler, H. Suche, F. Wehrmann und R. Wessel: Electronics Letters 35, 1185 (1999).
- [2] Paderborner Universitätszeitschrift (PUZ), Ausgabe 2/2003, S. 22-23; PUZ, Ausgabe 2/2004, S. 22-23.
- [3] K. Lischka: ForschungsForum Paderborn 2, 62 (1999). S. Potthast, E. Tschumak, M. Panfilova, D. J. As, K. Lischka, U. Hillerigmann, M. Abe, H. Nagasawa: "Field effect transistor based on cubic GaN/AlGaIn heterostructures", Appl. Phys. Lett. (eingereicht).
- [4] A. Zrenner: ForschungsForum Paderborn 9, 44 (2006). A. Zrenner, E. Beham, S. Stufler, F. Findeis, M. Bichler und G. Abstreiter: Nature 418, 612 (2002).
- [5] Paderborner Universitätszeitschrift (PUZ), Ausgabe 2/2000,

S. 30-32; PUZ, Ausgabe 1/2001, S. 26-27; PUZ, Ausgabe 3/2001, S. 14-15. U. Hilleringmann und Ch. Pannemann: ForschungsForum Paderborn 6, 38 (2003). Th. Haßheider, S. A. Benning, H.-S. Kitzerow, M.-F. Achard und H. Bock: Angew. Chem. Int. Ed. 40, 2060 (2001).

- [6] R.B. Wehrspohn, S. Greulich-Weber: ForschungsForum Paderborn 8, S. 10-14 (2005). G. Mertens, Th. Röder, R. Schweins, K. Huber, and H.-S. Kitzerow: Appl. Phys. Lett. 80, 1885 (2002). G. Mertens, R. B. Wehrspohn, H.-S. Kitzerow, S. Matthias, C. Jamois und U. Gösele: Appl. Phys. Lett. 87, 241108 (2005).
- [7] T. Weiland, R. Schuhmann, R. B. Gregor, C. G. Parazzoli, A. M. Vetter, D. R. Smith, D. C. Vier und S. Schultz: J. Appl. Phys. 90, 5419 (2001).

Kontakt: Prof. Dr. rer. nat. Artur Zrenner

Tel.: 05251/60 2692

E-Mail: Artur.Zrenner@upb.de



Foto: Schneider

Abb. 9: Projektleiter des CeOPP (v. l.): Prof. Klaus Huber, Prof. Artur Zrenner (Sprecher des „Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn“), Prof. Heinz-S. Kitzerow, Prof. Wolfgang Sohler, Prof. Klaus Lischka, Prof. Rolf Schuhmann, Prof. Andreas Thiede, Prof. Reinhold Noé, Prof. Ulrich Hilleringmann.

Arbeiten bei Benteler – eine Partnerschaft mit Perspektive

Hochschulabsolventen (m/w)

- Ingenieure
- Wirtschaftswissenschaftler

Sie haben praxisorientiert studiert und stehen kurz vor dem Abschluss.

Sie sind begeisterungsfähig und würden Ihre Ideen gern in einem internationalen Unternehmen kreativ umsetzen?

Wir bieten Ihnen die Herausforderung, die Sie suchen. In der Benteler-Gruppe werden Sie in innovativen Teams eingebunden und in unterschiedlichen Projekten gefordert. Ihre Konzepte zur Lösung von Problemen interessieren uns.

Sie sind noch im Studium? Kein Problem, auch ein Praktikum oder eine Diplomarbeit könnte der erste Einstieg sein.

Nutzen Sie Ihre Chance, wir freuen uns auf Ihre Online-Bewerbung.

Benteler AG
Personalentwicklung
Residenzstraße 1
33104 Paderborn
Tel.: 0 52 54.81-18 46

www.benteler.de

**Zeigen Sie bei uns,
was Sie können!**

Wir suchen engagierte Mitarbeiter, die zielorientiert, verantwortungsbewusst und pragmatisch handeln. Kurz: Menschen, die unseren Erfolg tragen.

Finden Sie Ihre berufliche Herausforderung und interessante Aufgaben bei einem der "Top 100 Unternehmen" der deutschen Industrie. Die international tätige Benteler-Gruppe beschäftigt in den Bereichen Automobiltechnik, Stahl/Rohr und Handel rund 19.000 Mitarbeiter an 150 Standorten in 34 Ländern.

BENTELER 

Automobiltechnik • Stahl/Rohr • Handel

Bestimmen Sie mit uns die Trends in der Automobilelektronik und Lichttechnik.



Als einer der größten und innovativsten Automobilzulieferer der Welt entwickeln wir die Trends der Zukunft, z. B. in den Bereichen Lichttechnik, Mechatronik und elektronische Systeme. Wir sind erfolgreich, weil wir bei allen Produkten die Standards setzen – in puncto Qualität, Innovation und Kundenorientierung.

Jeder Einzelne der insgesamt 24.000 Mitarbeiter/-innen trägt und lebt die Unternehmenswerte von Hella – an unseren internationalen Standorten genauso wie in unserer Zentrale in Lippstadt.



**Ideen für das
Auto der Zukunft**

High Potentials / Hochschulabsolventen / Diplomanden und Praktikanten (m/w)

■ Elektrotechnik ■ Maschinenbau ■ Mechatronik

Sie haben den Grundstein für Ihre Karriere gelegt und wollen richtig durchstarten. In einem Unternehmen, das Ihnen einfach mehr bietet. Hervorragende Entwicklungschancen für eine Karriere nach Maß.

Für unser starkes Wachstum in den innovativen Produktfeldern lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme, Karosserieelektronik und Lichtelektronik suchen wir qualifizierte Mitarbeiter/innen. Mit Hella arbeiten Sie an der Spitze des technischen Fortschritts in der Automobilindustrie.

Ihr Profil

- Überdurchschnittliche Studienleistungen
- Erste Praxiserfahrung
- Begeisterung für innovative Entwicklung
- Gute Englischkenntnisse
- Hohe Motivation und Einsatzbereitschaft

Ohne Umwege zum Erfolg! Detaillierte Informationen über unsere Jobangebote finden Sie unter www.hella.com/jobs. Wir freuen uns auf Ihre vollständigen Bewerbungsunterlagen.

Hella KGaA Hueck & Co.
Frau Birgit Zander · Hochschulmarketing
Rixbecker Straße 75 · 59552 Lippstadt
Tel. (0 29 41) 38-11 55
E-Mail: birgit.zander@hella.com

www.hella.de

Funktional gradierte Materialien und Strukturen

Neuer Sonderforschungsbereich im Maschinenbau

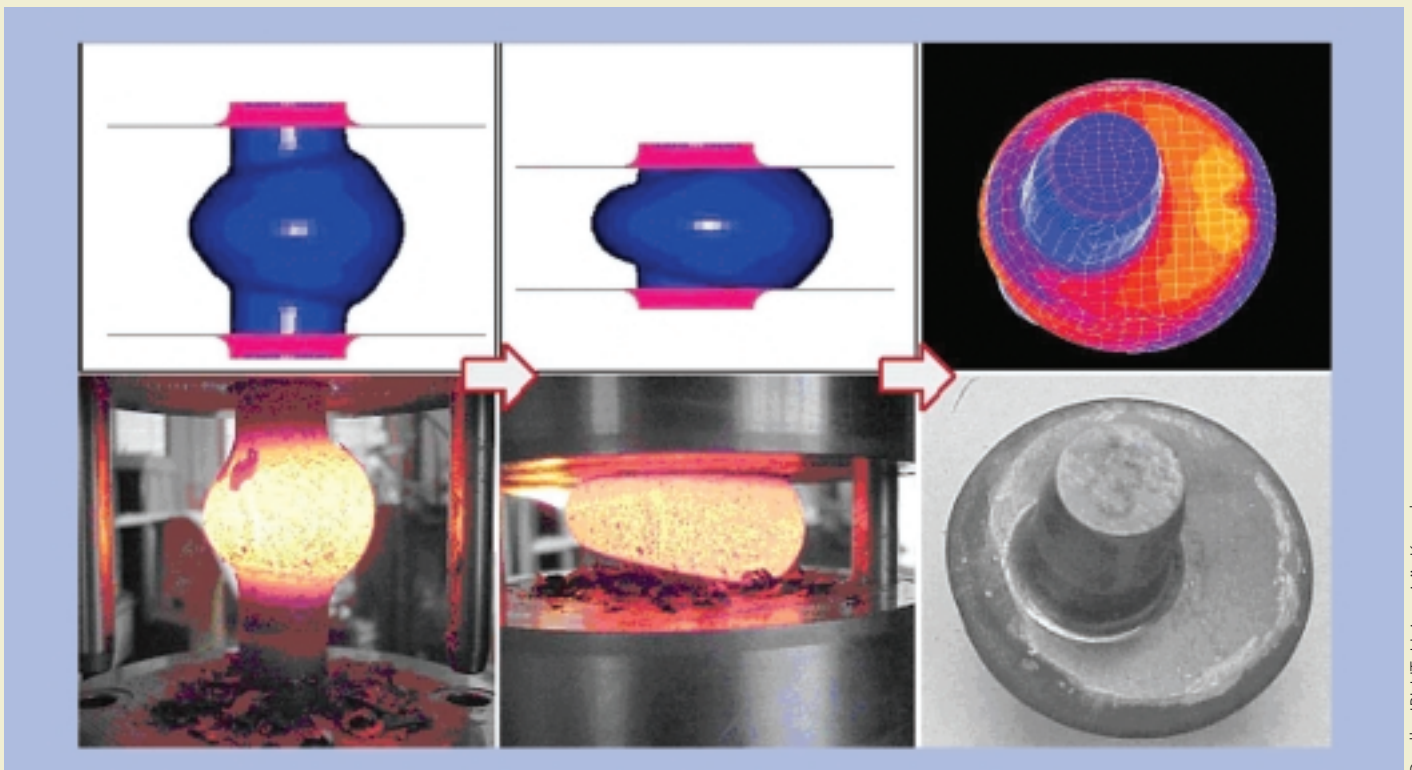
Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier,
Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier

Am 07.06.2006 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) die Einrichtung des Sonderforschungsbereichs Transregio 30 beschlossen, der sich mit der Herstellung und Charakterisierung funktional gradierter Materialien und Strukturen beschäftigt. Entwickelt werden sollen Materialien, die sich für den Einsatz u. a. im Automobil- und Flugzeugbau in besonderer Weise eignen. Für dieses anspruchsvolle Forschungsvorhaben wurden für die erste vierjährige Förderperiode insgesamt über 7,6 Millionen Euro bewilligt. Im Rahmen dieses Projektes kooperieren 18 Lehrstühle der Universitäten Kassel, Dortmund und Paderborn. Von Paderborner Seite sind die Lehrstühle von Prof. Hans Jürgen Maier (Standortsprecher), Prof. Rolf Mahnken, Prof. Hans Albert Richard und Prof. Jürgen Gausemeier beteiligt. Damit fließen die umfangreichen Vorarbeiten dieser Arbeitsgruppen auf den Gebieten der Werkstofftechnik, der Materialsimulation, der Bruchmechanik und des Wissensmanagements in das Know-how des SFB ein. Die Bewertung der Gutachter der Deutschen Forschungsgemeinschaft bestätigte die bereits erreichte internationale Spitzenstellung der Paderborner Arbeitsgruppen in ihren jeweiligen Forschungsschwerpunkten.

Ziele des SFB-Transregio

Insbesondere vor dem Hintergrund ständig steigender Rohstoffpreise ist der Gedanke des Leichtbaus in der ingenieurtechnischen Praxis von zunehmender Aktualität. Dies beinhaltet, die Funktion eines Bauteils mit möglichst geringem Materialaufwand zu erreichen, was u. a. dazu führt, dass die Festigkeitseigenschaften eines Materials optimal ausgenutzt werden müssen. Gleichzeitig werden aber auch immer höhere Ansprüche an die Integration verschiedener Funktionalitäten in einer einzelnen Struktur gestellt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Materialien mit speziellen Eigenschaften zu entwickeln, so dass zum Beispiel an einer hochbelasteten Stelle das Material des Bauteils besonders hohe Festigkeit aufweist, während an anderer Stelle besonders gute Dämpfungs- oder Verschleiß Eigenschaften gefordert sind. Dies erfordert Materialien mit lokal unterschiedlichen Eigenschaften, so genannte funktional gradierte Materialien, um damit Bauteile und Strukturen zu optimieren.

Der eingerichtete Sonderforschungsbereich Transregio 30 mit dem Titel „Prozessintegrierte Herstellung funktional gradierter Strukturen auf der Grundlage thermo-mechanisch gekoppelter Phänomene“ hat sich die Entwicklung solcher Materialien zum



Quelle: IPL-UT, Universität Kassel

Abb. 1: Simulation und Experiment bei der Ausbildung exzentrischer Vorformelemente.

Ziel gesetzt. In insgesamt 18 Teilprojekten beschäftigen sich Forscher der Universitäten Kassel, Dortmund und Paderborn mit der Fragestellung, wie durch geeignete Gestaltung des Herstellungsprozesses die gewünschten gradierten Eigenschaften in einer Struktur erzeugt und geprüft werden können (Abbildung 1).

Die Forschungsarbeit

gliedert sich dabei in vier Projektbereiche:

A. Prozessgestaltung:

In diesem fünf Teilprojekte umfassenden Projektbereich geht es darum, die prozesstechnischen Grundlagen für eine prognostizierbare und reproduzierbare Einstellung funktional gradiertter Eigenschaften in Bauteilen und Strukturen zu erarbeiten. Dabei werden sowohl metallische Werkstoffe (Stahl, Aluminium) als auch polymere Materialien (Kunststoffschaume) untersucht.

B. Materialmodellierung/Parameteridentifikation/Experimentelle Validierung:

Ziel dieses Projektbereichs ist es, im Rahmen von fünf Teilprojekten auf Basis von experimentellen Untersuchungen realitätsnahe Modelle zur Vorhersage der Materialeigenschaften infolge der komplexen Prozessführung zu entwickeln. Auf diese Weise können die lokalen mechanischen Eigenschaften in einem Bauteil gezielt optimiert werden.

C. Numerische Behandlung:

Der Projektbereich C mit drei Teilprojekten widmet sich der problemspezifischen Entwicklung neuartiger, innovativer numerischer Verfahren zur Vorhersage der untersuchten thermo-mechanisch gekoppelten Phänomene.

D. Prozessbegleitende Produktoptimierung:

Im Rahmen dieses Projektbereichs mit fünf Teilprojekten besteht die Zielsetzung darin, über die in den Projektbereichen A bis C vorgenommene Materialoptimierung hinaus den Einfluss der funktionalen Gradierung auch auf die Funktionalität des letztlich entstehenden Bauteils zu untersuchen. Die Rückkopplung der hier erworbenen Erkenntnisse in die Modellierung und Prozessführung stellt einen wesentlichen Optimierungsfaktor dar.

Die vier Projekte der beteiligten Paderborner Wissenschaftler sind in den Projektbereichen B (Prof. Mahnken, Prof. Maier) und D (Prof. Richard, Prof. Gausemeier) angesiedelt. Das Begutachtungsergebnis der DFG (drei der vier mit „exzellent“ bewerteten Projektanträge stammen aus Paderborn!) unterstreicht dabei den Stellenwert der Paderborner Forschungsvorhaben für den

Sonderforschungsbereich. Es zeigt sich aber auch, dass mehrjährige umfangreiche Vorarbeiten sowie die Bereitschaft und Fähigkeit, in fächerübergreifenden Kooperationen mitzuarbeiten, notwendig und letztlich auch erfolgreich waren.

Die Paderborner Projekte

Im Einzelnen beschäftigen sich die beteiligten Arbeitsgruppen der Universität Paderborn mit folgenden Problemstellungen:

Simulation von Hybridumformprozessen unter Berücksichtigung des Thermoschockverhaltens im Werkzeug sowie von Phasenumwandlungen im Werkstück

Technische Mechanik (Prof. Mahnken):



Prof. Dr.-Ing. Rolf Mahnken, M.Sc wurde im November 2002 auf den Lehrstuhl für Technische Mechanik an der Universität Paderborn berufen. Er war von 1986 bis 1997 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hannover und am Division of Solid Mechanics, Chalmers University of Göteborg, Schweden tätig. In den Jahren 1997 bis 1999 übernahm er eine Vertretungsprofessur für Materialwissenschaft an der Universität Hannover und war anschließend in der Abteilung für Berechnung und Entwicklung der Firma Alstom, Schweiz, im Gasturbinenbau beschäftigt. Die Arbeitsgebiete von Prof. Mahnken umfassen die zuverlässige Simulation innovativer Werkstoffe mit numerischen Verfahren. Mehr als 70 Veröffentlichungen in überwiegend internationalen Fachzeitschriften und Proceedingsbänden sind dazu von ihm als Autor und Mitautor erschienen.

Dieses Teilprojekt verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele. Zum einen geht es darum, durch die Verwendung von Materialsimulationen eine sinnvolle Werkzeugauslegung für die thermo-mechanisch hochbelasteten Umformwerkzeuge durchzuführen. Dabei stellt der Kontakt zwischen kalter Werkzeugkontur und heißem Werkstück eine Thermoschockbeanspruchung dar, die zu erheblichen lokalen Belastungen führen kann. Zum anderen sollen für das Werkstück geeignete Materialsimulationen durchgeführt werden, die die komplexen Phasenumwandlungsprozesse in Abhängigkeit des lokalen Temperaturfeldes beschreiben.

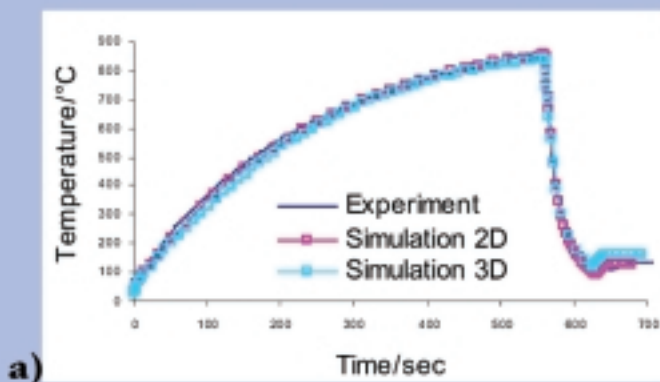
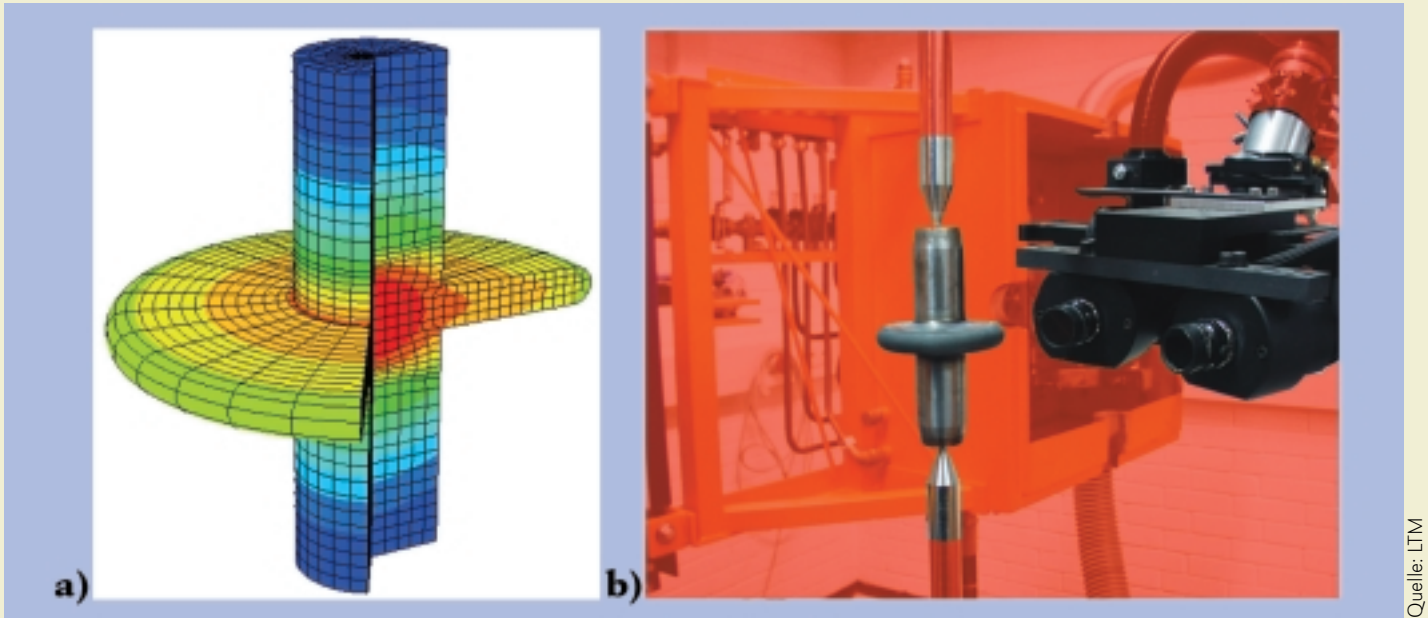


Abb. 2: a) Temperaturvergleich zwischen Simulation und Experiment bei Thermoschock b) Temperaturmessung in der Aufheizphase.



Quelle: LTM

Abb. 3: a) Temperaturfeldsimulation am Werkstück während der Hybridumformung b) 3D-Digitalisierung zur Formerfassung des Werkstücks.

Im Rahmen von Vorarbeiten wurde eine Versuchsanlage zur Thermoschockuntersuchung aufgebaut und 2D- und 3D-Simulationen von Temperatur-Zeit-Verläufen durchgeführt, Abbildung 2a, b. Die Temperaturfeldsimulationen für ein Werkstück, Abbildung 3a, zeigen im Vergleich zu Messungen, Abbildung 3b, sehr gute Übereinstimmung. Die wesentlichen Vorergebnisse hierzu sind in [1] und [2] zusammengefasst.

Dynamische Mikrostrukturänderungen in thermo-mechanisch gekoppelten Prozessen

Werkstoffkunde (Prof. Maier):



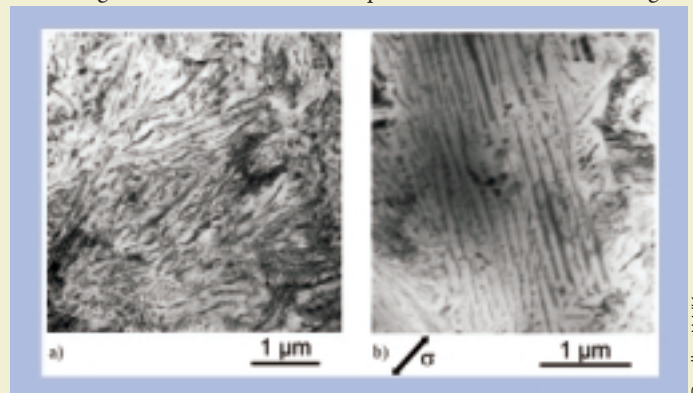
Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier studierte Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Die Promotion erfolgte 1990 am Lehrstuhl für Korrosion und Oberflächentechnik. Von 1990 bis 1993 leitete er die Arbeitsgruppe Elektronenmikroskopie am Lehrstuhl für Allgemeine Werkstoffeigenschaften der FAU. Mit der Ernennung zum Oberingenieur im Jahr 1993

übernahm er die Leitung der Arbeitsgruppe Materialermüdung am Institut für Werkstofftechnik der Universität Siegen. 1996 verbrachte er einen einjährigen Forschungsaufenthalt am Dept. of Mechanical & Industrial Eng. der University of Illinois, USA. Im März 1999 erfolgte die Berufung auf den Lehrstuhl für Werkstoffkunde an der Universität Paderborn.

Entscheidend für die Ausbildung gradiertter Eigenschaften ist der mikrostrukturelle Gefügeaufbau. Aufgrund der in Stahlwerkstoffen auftretenden Phasenumwandlungen ist hier die Modellierung und somit die zuverlässige Voraussage der sich einstellenden Gefügestruktur mit besonderen Schwierigkeiten verbunden. Je nach Art und Richtung der auftretenden äußeren oder inneren Spannungen in einem Bauteil sowie abhängig vom lokalen Temperaturfeld ergibt sich eine unterschiedliche Kinetik der Phasenumwandlung und der sich einstellenden Mikrostruktur (Abbildung 4) und damit der Werkstoffeigenschaften. Ziel dieses

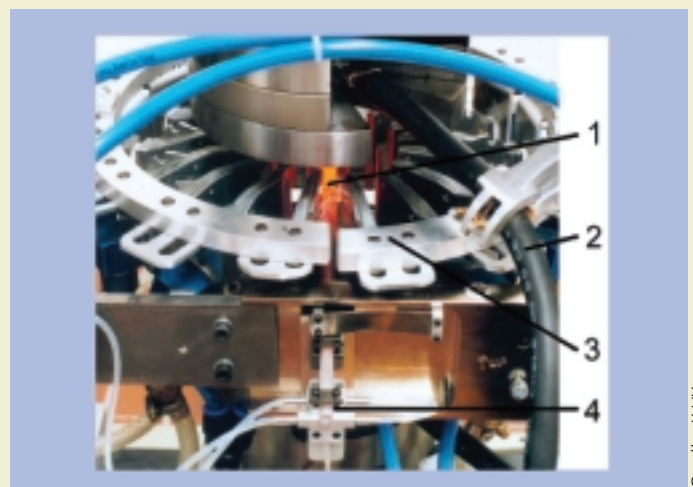
Teilprojektes ist es daher, mithilfe von systematischen Untersuchungen die Einflüsse der Lastparameter zu analysieren und für die weitere Verwendung zu quantifizieren.

Die für dieses Teilprojekt relevanten umfangreichen Vorarbeiten konzentrieren sich insbesondere auf die Kinetik der Phasenumwandlung. Dabei wurden sowohl spezielle Versuchseinrichtungen



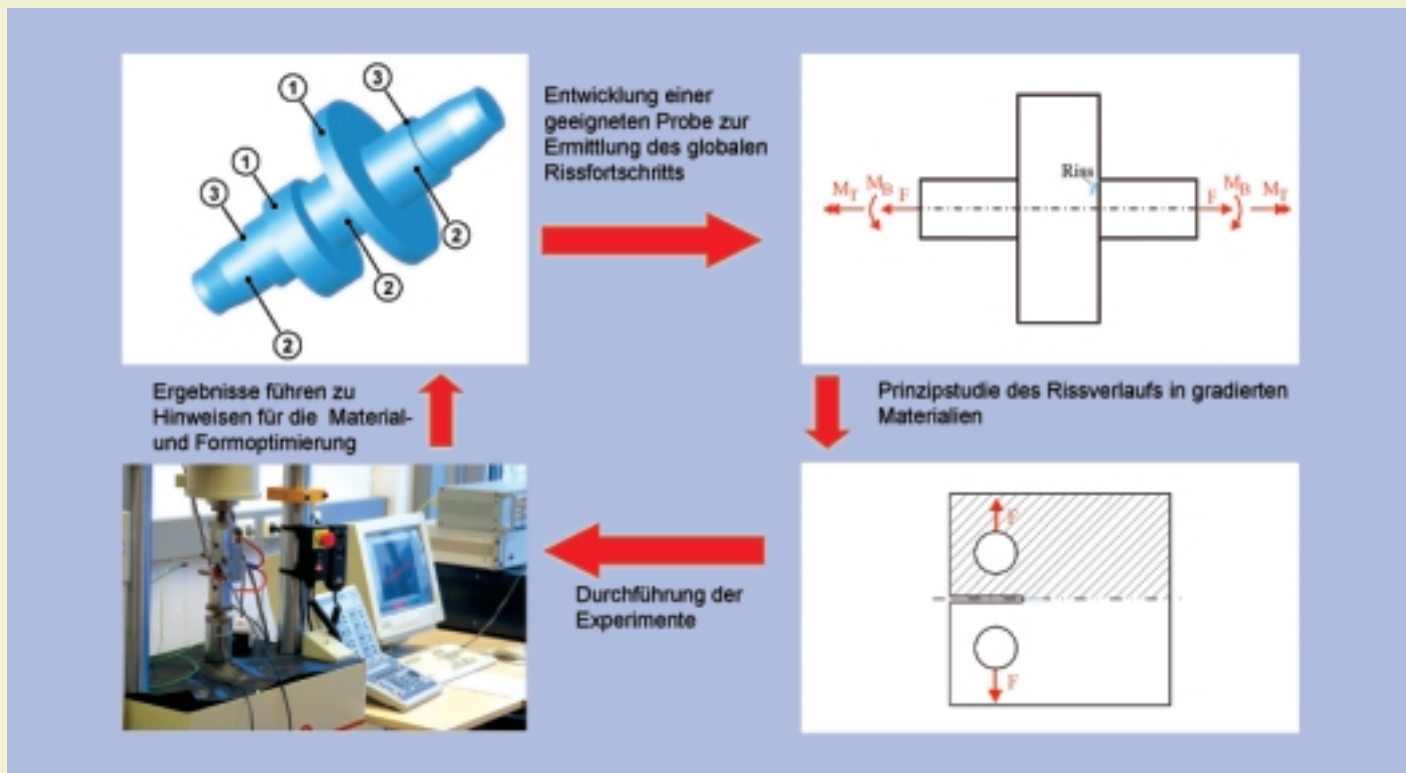
Quelle: LWK

Abb. 4: TEM-Hellfeldaufnahmen des perlitischen Gefüges nach isothermer Umwandlung bei 595° C, Stahl mit 0,4 Ma.-% C. a) ohne äußere Belastung, b) Belastung mit einer Spannung $\sigma = 85 \text{ MPa}$ während der Umwandlung.



Quelle: LWK

Abb. 5: Belastungsdilatometer zur Messung der Kinetik der lastabhängigen Phasenumwandlung. Erkennbar sind die Probe (1), die Stromzuführung (2), das Gasdüsenfeld (3) sowie das Extensometer für die Messung der Querdehnung (4).



Quelle: FAM

Abb. 7: Probenentwicklung am Beispiel des Technologieträgers Antriebswelle.

konzipiert (Abbildung 5) als auch prozessbeschreibende mikro-physikalische Materialmodelle entwickelt und verifiziert. Die Untersuchungsergebnisse, ([3], [4]) haben bereits internationale Bekanntheit erlangt.

Risswachstum in gradierten Materialien und Strukturen

Angewandte Mechanik (Prof. Richard):



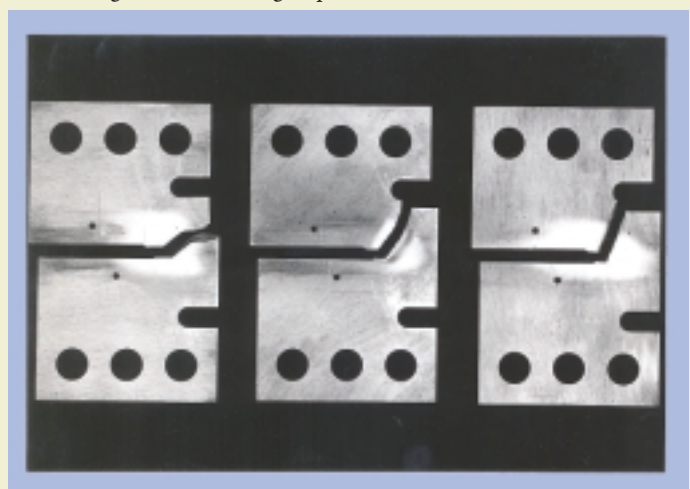
Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard ist Professor für Angewandte Mechanik an der Universität Paderborn. Seine Arbeitsgebiete sind die festigkeitsoptimierte und bruch sichere Gestaltung von Bauteilen und Strukturen sowie die Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates. Er promovierte 1979 und habilitierte 1984 an der Universität Kaiserslautern. 1986 folgte er dem Ruf an die Universität

Paderborn, an der er von 1991 bis 1995 Rektor war. Prof. Richard ist Vorsitzender des Westfälischen Umwelt Zentrums (WUZ). 2004 erhielt er in Stockholm mit der GRIFFITH-Medaille die weltweit höchste Auszeichnung auf dem Gebiet der Bruchmechanik. Im Jahr 2006 wurde er von Deutschen Verband für Materialforschung und -prüfung mit der WÖHLER-Medaille geehrt.

Bei der Entwicklung neuer Materialien ist von praktischer Bedeutung, dass sie hinsichtlich der statischen Festigkeitswerte, der Dauerfestigkeitswerte, der Rissemphindlichkeit und der erreichbaren Lebensdauer optimiert werden. Untersuchungen über Rissausbreitungsvorgänge sind daher von großer Wichtigkeit. Ziel dieses interdisziplinären Teilprojekts, das gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Analysis und Angewandte Mathematik der Universität Kassel bearbeitet wird, ist die Beschreibung und

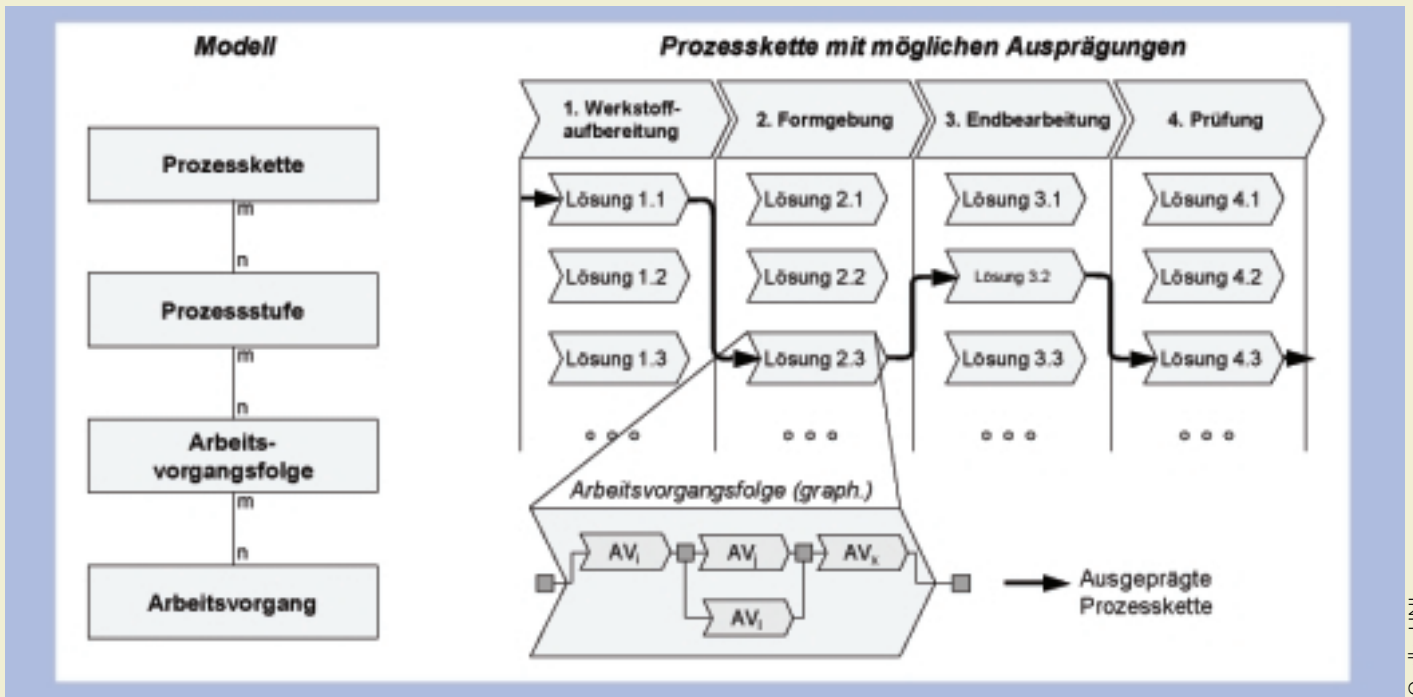
Vorhersage von Rissausbreitungsvorgängen in gradierten Materialien und Strukturen. Für gradierte Materialien ergibt sich, wie Vorarbeiten zeigen, als besondere Schwierigkeit, dass neben der Beanspruchung eines Bauteils auch die Gradierung selbst maßgeblichen Einfluss auf das Rissausbreitungsverhalten besitzt (Abbildung 6). Dabei besteht die besondere Methodik in der engen Verzahnung von mathematisch-theoretischen Modellen, ihrer Umsetzung in numerisch verwertbare Algorithmen sowie der Verifikation und Optimierung durch experimentelle Untersuchungen (Abbildung 7).

Seit vielen Jahren werden in der Arbeitsgruppe Richard Rissausbreitungsvorgänge theoretisch, numerisch und experimentell untersucht. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten sind neben zahlreichen nationalen und internationalen Publikationen (z. B. [5], [6]) unter anderem auch Simulationsprogramme für zwei- und dreidimensionale Rissausbreitung sowie Steuerungssoftware zur automatischen Durchführung verschiedenster Ermüdungsrissausbreitungsexperimente entwickelt worden.



Quelle: FAM

Abb. 6: Einfluss von gradierten Materialeigenschaften auf das Risswachstum bei CTS-Proben bei gleicher Belastungsrichtung.



Quelle: HNI

Abb. 8: Hierarchische Struktur einer Prozesskette und einer ausgeprägten Prozesskette.

Interaktive Exploration und multikriterielle Optimierung bei der Planung von thermo-mechanisch gekoppelten Fertigungsprozessen für gradierte Strukturen

Rechnerintegrierte Produktion (Prof. Gausemeier):



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier ist seit 1990 Professor für Rechnerintegrierte Produktion am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Er promovierte 1977 am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin bei Prof. Spur. In seiner zwölfjährigen Industrietätigkeit war Dr. Gausemeier Entwicklungschef für CAD/CAM-Systeme und zuletzt Leiter des Produktbereiches

Prozessleitsysteme bei einem namhaften Schweizer Unternehmen. Über die Universitätsgrenzen hinaus engagiert er sich u.a. als Mitglied des Vorstands und Geschäftsführer des Berliner Kreis-Wissenschaftlichen Forums für Produktentwicklung e. V. Ferner ist Prof. Gausemeier Initiator und Aufsichtsratsvorsitzender des Beratungsunternehmens UNITY AG. 2003 wurde Prof. Gausemeier in den „Konvent für Technikwissenschaftler der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V. (acatech)“ aufgenommen.

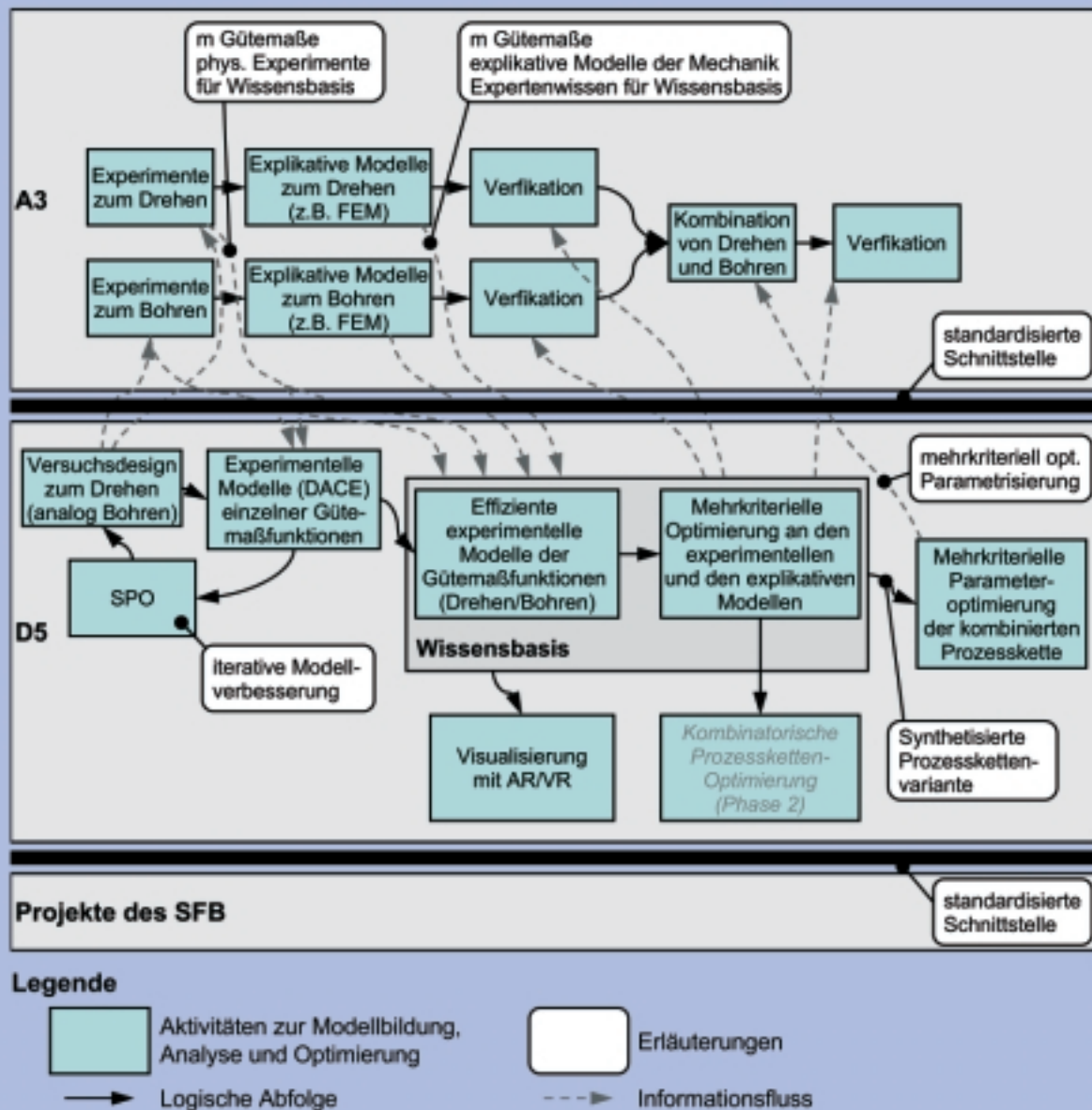
Dieses Projekt übt für den gesamten Sonderforschungsbereich eine Querschnittsfunktion aus. Die Vision besteht darin, ein umfassendes System zur Beschreibung und Optimierung von thermo-mechanisch gekoppelten Fertigungsprozessen zu liefern. Das zu erarbeitende Instrumentarium umfasst dabei u. a. Syntheseverfahren zur Generierung von Prozessketten (Abbildung 8), Techniken zur Analyse und Optimierung, eine Wissensbasis sowie Verfahren zur intuitiven Exploration (Virtual Reality). Exemplarisch ist in Abbildung 9 die zu entwickelnde Interaktion zwischen zwei Teilprojekten dargestellt. Die hierzu nötigen Vorarbeiten führten zu zahlreichen Publikationen. Zusammenfassende Darstellungen finden sich u. a. in [7], [8].

Ausblick

Der neu eingerichtete SFB Transregio hat Mitte letzten Jahres seine Arbeit aufgenommen. In der konstituierenden Sitzung wurde Prof. Dr. Kurt Steinhoff, Universität Kassel, zum Sprecher des SFB gewählt. Zusätzlich zu den vielfältigen Vernetzungen zwischen den einzelnen Teilprojekten, die sich unmittelbar aus der Verzahnung der anspruchsvollen Forschungsaufgaben ergeben, ist es ein erklärtes Anliegen des SFB, den interdisziplinären Wissensaustausch zu fördern. Zu diesem Zweck sind vier zusätzliche Arbeitsgruppen mit Querschnittsfunktion eingerichtet worden. Neben der Bereitstellung einer Diskussionsplattform sollen die Arbeitskreise Modellierung und Simulation, Eigenschaftscharakterisierung funktional gradierten Werkstoffe, Produkt-Prozess-Wechselwirkung sowie Design of Experiments – Statistische Versuchsplanung durch Kurse und Workshops insbesondere auch den wissenschaftlichen Nachwuchs fördern.

Literatur

- [1] Mahnken, R.: Void Growth in Finite Deformation Elastoplasticity due to hydrostatic stress states, *Comp. Meths. Appl. Mech. Eng.* 194 (2005), 3689-3709.
- [2] Gockel, F.-B.; Mahnken, R.: Thermal Shock: Experimental Analysis and Finite Element Simulation, *Proc. of 6th Int. Congress on Thermal Stresses*, Vienna, Austria, May 2005, Vol. 2.
- [3] Maier, H.-J.; Ahrens, U.: Isothermal Bainitic Transformation in Low Alloy Steels: Factors Limiting the Prediction of the Resulting Material's Properties. *Z. Metallkd.*, 93 (2002), 712-718.
- [4] Gall, K.; Biallas, G.; Maier, H.-J.; Gullet, P.; Horstmeyer, M.F.; McDowell, D.L.: In-Situ Observations of Low-Cycle Fatigue Damage in Cast AM60B Magnesium in an Environmental Scanning Electron Microscope. *Metall. Mater. Trans. A* 35A (2004), 321-331.
- [5] Richard, H.A.; Fulland, M.; Sander, M.: Theoretical Crack Path Prediction. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 28 (2005), 3-12.



Quelle: HNI

Abb. 9: Exemplarische Darstellung der Interaktion von Modellbildung und Optimierung zwischen Projekt D5 und Projekt A3.

- [6] Fulland, M.; Richard, H.A.: Application of the FE-Method to the Simulation of Fatigue Crack Growth in Real Structures. Steel Research 74 (2003), 584-590.
- [7] Gausemeier, J.: From Mechatronics to Self-optimizing Concepts and Structures in Mechanical Engineering – New Approaches for Design Methodology. Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing (2005).
- [8] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Eckes, R.: Virtual Production – Computer Model-Based Planning and Analyzing of Manufacturing Systems. In: Datchenko, O. (Ed.): Reconfigurable Manufacturing Systems. Berlin, Springer-Verlag, 2005.



Dr.-Ing. Markus Fulland studierte Technomathematik an der Universität Paderborn. Von 1998 bis 2003 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Angewandte Mechanik der Fakultät Maschinenbau und promovierte in dieser Zeit auf dem Gebiet der numerischen Bruchmechanik. Seit 2003 ist er Angestellter des Westfälischen Umwelt Zentrums.

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier
Tel.: 05251/60 3855
E-Mail: hmaier@mail.uni-paderborn.de

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard
Tel.: 05251/60 5324
E-Mail: richard@fam.upb.de

Software-Qualität – überall!

Excel-lente Software

Jan-Christopher Bals, Fabian Christ, Prof. Dr. rer. nat. Gregor Engels, Stefan Sauer

Computer und damit auch Software begegnen uns mittlerweile in allen Lebenslagen. Angefangen bei den elektronischen Geräten im Haushalt, über die Fahrt mit dem hoch technisierten Auto zur Arbeitsstelle bis hin zur Benutzung von Büro-Systemen oder speziell für den Arbeitsplatz zugeschnittenen Software- oder eingebetteten Systemen wird unser Leben mehr und mehr von Softwaresystemen abhängig. Da diese Softwaresysteme für uns als Anwender in der Regel nicht zu ändern sind, müssen wir uns darauf verlassen können, dass die Systeme das tun, was wir von ihnen erwarten. Fehler in einem Softwaresystem können erhebliche finanzielle und gesundheitliche Schäden verursachen. Als Beispiel seien hier etwa Patientendaten in einem Krankenhaus oder auf einer Gesundheitskarte genannt. Unberechtigter Zugriff auf derartige Daten oder Fehler beim Übermitteln dieser Daten an den behandelnden Arzt können gravierende Folgen für die Gesundheit des Patienten und damit für die finanzielle Situation des Krankenhauses haben.

Aus diesem Grunde ist das Thema „Software-Qualität“ in den letzten Jahren immer stärker auch in das wissenschaftliche Interesse der Informatik gerückt. Die Qualität eines Softwaresystems ist dabei von vielen Faktoren abhängig. Zum einen ist das Softwaresystem als Produkt das Ergebnis eines Entwicklungsprozesses. Klar definierte Verantwortlichkeiten und Arbeitsschritte sowie der Einsatz von effektiven Werkzeugen sind wesentliche Grundlagen für einen Entwicklungsprozess, der am Ende ein qualitativ hochwertiges Softwareprodukt abliefert.

Aber wann ist ein Softwaresystem von hoher Qualität? Sicherlich wichtig ist, dass es korrekt ist, also das tut, was von ihm erwartet wird. Hiermit sind dann noch viele andere Eigenschaften verbunden. Dazu gehört etwa, dass es einfach zu bedienen ist, dass es effizient arbeitet und z. B. in angemessener Zeit auf Benutzereingaben reagiert oder dass es ohne große Schwierigkeiten auf verschiedenen Plattformen eingesetzt werden kann.

So weit, so gut. Das ist sicherlich richtig – aber wieso ist das für mich als reiner Anwender von Softwaresystemen überhaupt wichtig? Das ist doch nur wichtig für Informatiker, die professionell Software entwickeln. Ich muss doch davon ausgehen können, dass die Software von hoher Qualität ist. Oder?

Schon, aber bei heutigen Softwaresystemen ist es immer häufiger möglich, sie den persönlichen Bedürfnissen anzupassen. Das heißt, dass man auch als Anwender die Funktionalität eines Systems verändern kann. Das kann sich im einfachsten Fall darauf beschränken, dass man das Aussehen der Benutzungsschnittstelle beeinflussen kann. Es kann aber auch bedeuten,



Prof. Dr. rer. nat. Gregor Engels

ist Vorstandsvorsitzender des Software Quality Lab (s-lab) an der Universität Paderborn. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der modellbasierten, objektorientierten Softwareentwicklung, der Qualität von Softwaremodellen und der visuellen, domänenspezifischen Modellierungssprachen. Er leitet die Forschungsgruppe Datenbank- und Informationssysteme im Institut für Informatik.

dass man durch die Definition von Makros Folgen von Arbeitsschritten mit einem System vereinfachen kann.

Im Extremfall geht das sogar so weit, dass man als Anwender selbst Software entwickelt. Viele von uns benutzen im Beruf oder in der Freizeit Spreadsheet-Anwendungen (Tabellenkalkulationsprogramme) wie Microsoft Excel, um Berechnungen und Planungen durchzuführen. Auch wenn dies auf den ersten Blick nicht offensichtlich ist, handelt es sich hierbei tatsächlich um Softwareentwicklung durch den Anwender. Durch das Festlegen von Tabellenstrukturen und das Festlegen von Berechnungsformeln werden kleine Programme erstellt. Diese Spreadsheet-Anwendungen sind heutzutage in vielen Unternehmen eine wichtige Grundlage für weit reichende Managemententscheidungen. Aber auch im privaten Bereich werden Spreadsheet-Anwendungen z. B. dafür verwendet, den Medizinbedarf eines Patienten pro Tag festzulegen. Genau wie in einem beliebigen Softwaresystem können Fehler natürlich auch in einer Spreadsheet-Anwendung gravierende Folgen haben.

Das Forschungsgebiet „End User Software Development“ beschäftigt sich mit der wissenschaftlichen Erforschung von Methoden, um die Entwicklung von Software durch den Anwender zu verbessern. In einer engen Kooperation mit den Forschungsgruppen von Prof. Dr. Martin Erwig und Prof. Dr. Margaret Burnett von der Oregon State University in Corvallis, Oregon (USA), haben wir jetzt in einem gemeinsamen Forschungsprojekt die Entwicklung von Spreadsheet-Anwendungen untersucht und verbessert.

Ausgangssituation und Problemstellung

Fehler in Spreadsheet-Anwendungen entstehen häufig dann, wenn man bestimmte Bereiche einer Tabelle, die Berechnungen enthalten, mehrmals verwenden möchte. Die Tabelle in Abbil-

D5		fx =C5*E1			
	A	B	C	D	E
1	Rechnung			Mwst.	16%
2				Rabatt	12%
3					
4	Nr.	Artikel	Netto Preis	Steuer	Preis
5	1	Bildschirm	239,95 €	38,39 €	278,34 €
6				Summe	278,34 €

Abb.1: Rechnung.

dung 1 kann beispielsweise aus mehreren Rechnungsposten bestehen. Hier wird für einen einzelnen Rechnungsposten aus dem Netto-Preis zuzüglich der Mehrwertsteuer der zu zahlende Preis berechnet. Unterhalb der einzelnen Rechnungsposten wird die Summe über alle Preise gebildet und so die zu entrichtende Endsumme errechnet (Abbildung 1).

Die Formeln zur Berechnung der Posten in Zeile 5 können wie folgt angegeben werden:

- $D5 = C5 * E1$
- $E5 = C5 + D5$
- $E6 = \text{SUMME}(E5:E5)$

Da in Abbildung 1 nur ein Rechnungsposten vorliegt, bildet sich die Endsumme in E6 nur über den Bereich einer einzelnen Zelle. Da man aber die Rechnung flexibel erweitern möchte und auch Rechnungen mit mehreren Rechnungsposten erlauben will, wird in E6 gleich eine Summenformel angewandt. Wenn man nun einen zweiten Rechnungsposten einfügt, indem man die Zeile des ersten Rechnungspostens kopiert und in der darunter liegenden Zeile einfügt, entsteht die folgende Tabelle (Abbildung 2).

Unglücklicherweise enthält diese Tabelle nun gleich zwei Berechnungsfehler, die nicht unbedingt auf Anhieb entdeckt werden. Im Spreadsheet in Abbildung 2 wurde lediglich die Zeile des ersten Rechnungspostens kopiert und darunter eingefügt. Weiterhin wurden die Nummer auf den Wert „2“ für den zweiten Posten gesetzt und die Artikelbezeichnung sowie der Netto-Preis für den Artikel „Kamera“ angepasst.

Die für den zweiten Artikel berechnete Mehrwertsteuer beträgt nun 23,98 Euro. Doch rechnet man selbst nach, so merkt man, dass nicht 23,98 Euro, sondern 31,98 Euro Mehrwertsteuer anfallen. Betrachtet man die Formel zur Berechnung der Mehrwertsteuer in Zeile 6, die durch das Kopieren des ersten Rechnungspostens entstanden ist, so entdeckt man den Fehler schnell. Denn wie in Abbildung 2 am oberen Rand zu sehen ist, wird zur Berechnung der Mehrwertsteuer nicht der Wert der Zelle E1 sondern der der Zelle E2 benutzt. Doch diese Zelle enthält den Prozentsatz für den Rabatt. Der Fehler entsteht also dadurch, dass im ersten Rechnungsposten die Formeln mit relativen Zellbezügen (z. B. E1) aufgebaut wurden. Wird eine Formel wie $C5 * E1$ kopiert und eine Zeile tiefer wieder eingefügt, so werden diese relativen Zellbezüge an diese Zeile angepasst, indem der jeweilige Zeilenindex um 1 erhöht wird. Es entsteht die Formel $C6 * E2$. Dadurch wird anstelle des Mehrwertsteuersatzes in Zelle E1 der Rabattsatz in Zelle E2 zur Berechnung verwendet.

D6		fx =C6*E2			
	A	B	C	D	E
1	Rechnung			Mwst.	16%
2				Rabatt	12%
3					
4	Nr.	Artikel	Netto Preis	Steuer	Preis
5	1	Bildschirm	239,95 €	38,39 €	278,34 €
6	2	Kamera	199,85 €	23,98 €	223,83 €
7				Summe	278,34 €

Abb. 2: Erweiterte Rechnung.

Der Fehler wäre nicht aufgetreten, wenn die Formeln statt der relativen Referenzen (z. B. E1) absolute Referenzen (z. B. \$E\$1) beinhaltet hätten. Denn stellt man dem Spalten- oder Zeilenindex in einer Referenz ein Dollarzeichen voran, so wird diese Referenz durch das Kopieren und Einfügen an anderer Stelle nicht verändert. Es handelt sich um absolute Referenzen.

In MS Excel wäre eine weitere Alternative die Definition eines Namens für die Zelle E1; man gibt E1 z. B. den Namen „MwSt“. Dies ist jedoch nichts anderes als eine absolute Referenz der Form \$E\$1 anzulegen. Excel behandelt diese beiden Konstrukte intern identisch. Das Beispiel in Abbildung 1 müsste wie folgt geändert werden, um mit absoluten Referenzen zu arbeiten:

- $D5 = C5 * \$E\1
- $E5 = C5 + D5$
- $E6 = \text{SUMME}(E5:E5)$

Viele Anwender lernen die Bedeutung dieser speziellen Referenz und der Steuerzeichen (\$) erst, nachdem sie einmal in die Copy & Paste-Falle getappt sind. Doch selbst wenn man die Bedeutung dieser absoluten Referenz kennt, kann es immer noch zu Fehlern kommen, wenn man eine bestehende Tabelle, bei deren Entstehung nur relative Referenzen eingesetzt wurden, nachträglich erweitert. Hier kann es durchaus vorkommen, dass man schlicht vergisst, die Formeln auf absolute Referenzen umzustellen.

Ein weiterer Fehler in Abbildung 2 steckt in der Bildung der Summe über alle Preise der Rechnungsposten. Bei einem flüchtigen Blick mag es ein Anwender übersehen, aber die Endsumme wurde mit dem Einfügen einer neuen Zeile ebenfalls nicht korrigiert. Die Summe wird mit 278,34 Euro beziffert, aber korrekt wären 510,17 Euro. Excel erkennt nicht, dass die Summe nun über einen erweiterten Bereich zu bilden ist. Unter gewissen Umständen bekommt der Anwender eventuell einen Hinweis eingeblendet – in diesem Fall nicht einmal das. Korrekt müsste die Summe in Abbildung 2 folgendermaßen gebildet werden:

- $E7 = \text{SUMME}(E5:E6)$

Die Schlussfolgerung ist, dass der Anwender für die Eingabe neuer Daten alle Formeln und Bezüge im Blick haben muss, um Formeln bei Bedarf korrekt anpassen zu können. In großen Anwendungen ist dies eine schwierige Aufgabe – Fehler entstehen schnell und bleiben oftmals unbemerkt.

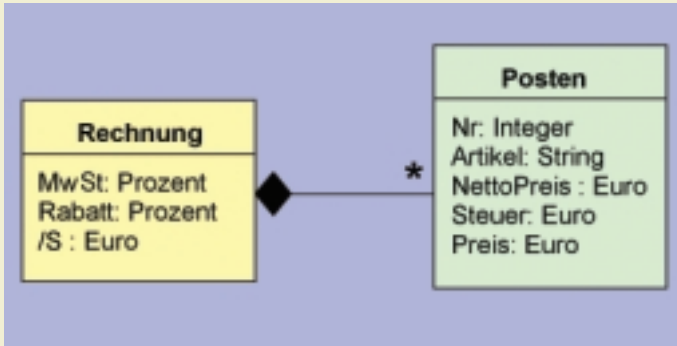


Abb. 3: UML-Modell für die Spreadsheet-Anwendung.

Ein Lösungsansatz:

Modelle für Spreadsheet-Anwendungen

Wie lassen sich solche Fehler vermeiden? Sie ließen sich vermeiden, wenn der Anwender dem Spreadsheet-System, hier Excel, die ihm bewusste Struktur der Tabelle mitteilen könnte. Ein Anwender weiß, dass in der Zelle E1 der Prozentsatz der Mehrwertsteuer steht. Wenn er in der Festlegung einer Formel diese Information direkt nutzen könnte, müsste er die fehleranfällige Umsetzung in kryptische Indizes nicht durchführen.

Auch weiß der Nutzer, dass am Ende immer eine Summe über alle Posten zu bilden ist. Könnte man Excel mitteilen, dass hier eine Struktur dynamisch in vertikaler Richtung, also nach unten, wächst, so könnte Excel die Endsumme automatisch korrigieren. Wie lassen sich Informationen über die Struktur einer Tabelle in Excel integrieren? Eine Excel-Tabelle kennt nur Spalten, Zeilen und Zellen. Spalten und Zeilen erhalten Indizes, wodurch einzelne Zellen exakt adressiert werden können. In einer Excel-Tabelle können keine weiteren Informationen über die Struktur der Tabelle hinterlegt werden.

Unser Lösungsansatz besteht nun darin, den in der Softwareentwicklung allgemein akzeptierten Schritt einer objektorientierten Modellierung vor der eigentlichen Programmierung auch für die Entwicklung von Spreadsheet-Anwendungen einzuführen. In einem derartigen objektorientierten Modell werden die Objekte des Anwendungsbereichs, ihre Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Objekten identifiziert und im Modell hinterlegt.

Was bedeutet dies für das Beispiel? Auch hier lassen sich derartige Objekte und Beziehungen erkennen. So kann man die gesamte Tabelle als ein Objekt mit Namen „Rechnung“ ansehen. Dieses Objekt kann man weiter unterteilen, indem man die Konstanten (MwSt., Rabatt) oben rechts als Eigenschaften bzw. Attribute einer Rechnung ansieht. Die Rechnungsposten der Rechnung bilden ein weiteres Objekt mit Attributen (Nummer, Artikel, Netto-Preis, ...) mit dem Namen „Posten“. Da die einzelnen Rechnungsposten in der Rechnung liegen, wird das Objekt Posten als inneres Objekt des Objekts Rechnung verstanden.

Da die Rechnungsposten eine dynamisch wachsende Struktur bilden, der immer neue Posten hinzugefügt werden, muss dies ebenfalls im Modell ausgedrückt werden. Eine Möglichkeit ist, dass man dem Objekt „Posten“ die Eigenschaft verleiht, dass es in vertikaler Richtung wachsen kann. So kann Excel mitgeteilt werden, dass hier auf Wunsch des Benutzers immer neue Zeilen einzufügen sind und alle Formeln, die sich auf diese Posten beziehen, entsprechend zu korrigieren sind.

Wenn Excel nun statt des ursprünglichen Modells ein derartiges objektorientiertes Modell zur Verfügung hätte, dann ließen sich die Formeln auf eine völlig neue Weise definieren. Denn statt der üblichen, kryptischen Referenzierung über Buchstaben und Zahlen, die in bestimmten Fällen noch mit Steuerzeichen versehen werden müssen, könnte eine Referenzierung durch Verwendung des Namens der Objekte und Attribute erreicht werden. Innerhalb des Rechnungspostens könnte man die Berechnung der Mehrwertsteuer dann folgendermaßen formulieren:

$$\text{Posten.Steuer} = \text{Posten.NettoPreis} * \text{Rechnung.MwSt}$$

Hier wird also z. B. ein Attribut im Objekt Rechnung direkt über den Namen angesprochen (Rechnung.MwSt). Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass Excel auch nach Copy & Paste-Aktionen immer noch genau weiß, welche Zellen adressiert werden müssen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass ein Attribut „Preis“ eines jeden Rechnungspostens definiert werden kann, um anschließend automatisch eine Summe „S“ über alle verfügbaren Preise zu bilden. Dies kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \text{Posten.Preis} &= \text{Posten.NettoPreis} + \text{Posten.Steuer} \\ \text{Rechnung.S} &= \text{SUMME}(\text{Posten.Preis}) \end{aligned}$$

Wie muss

Excel erweitert werden?

Um in Excel auf diese Weise arbeiten zu können, muss zunächst ein spezielles objektorientiertes Modell für Tabellen zur Verfügung stehen. Eine in der allgemeinen Softwareentwicklung übliche Darstellung als UML-Klassendiagramm (Abbildung 3) wäre hier nicht angebracht. In einem derartigen Modell würden zwar alle strukturellen Eigenschaften präzise festgelegt. Allerdings wäre eine derartige Darstellung für einen gewöhnlichen Spreadsheet-Nutzer nicht akzeptabel, da es nicht dem üblichen Look-and-Feel eines Spreadsheets entspricht. Ein Spreadsheet-Modell muss Informationen über die Struktur der Tabelle aufnehmen können (Objekte, Attribute) und gleichzeitig das Layout der Tabelle widerspiegeln (Abbildung 4).

Darüber hinaus muss es natürlich möglich sein, Informationen

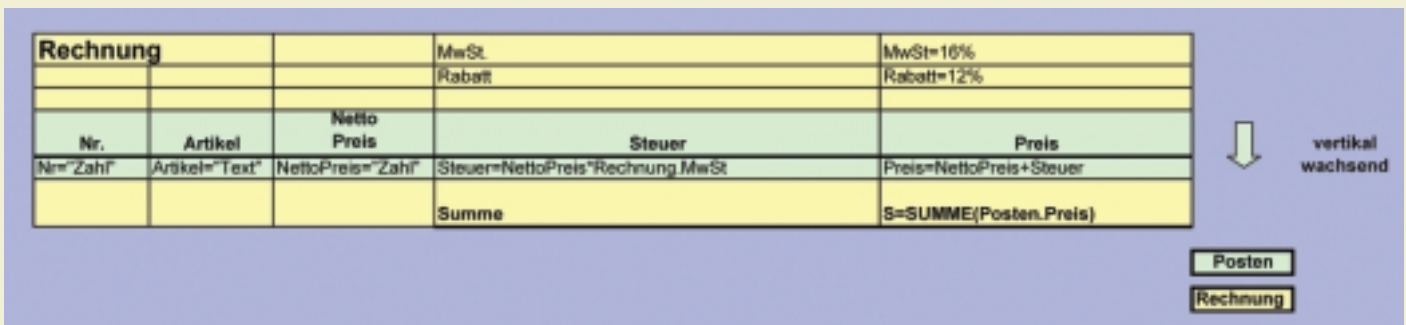


Abb. 4: ClassSheet-Modell für die Spreadsheet-Anwendung.

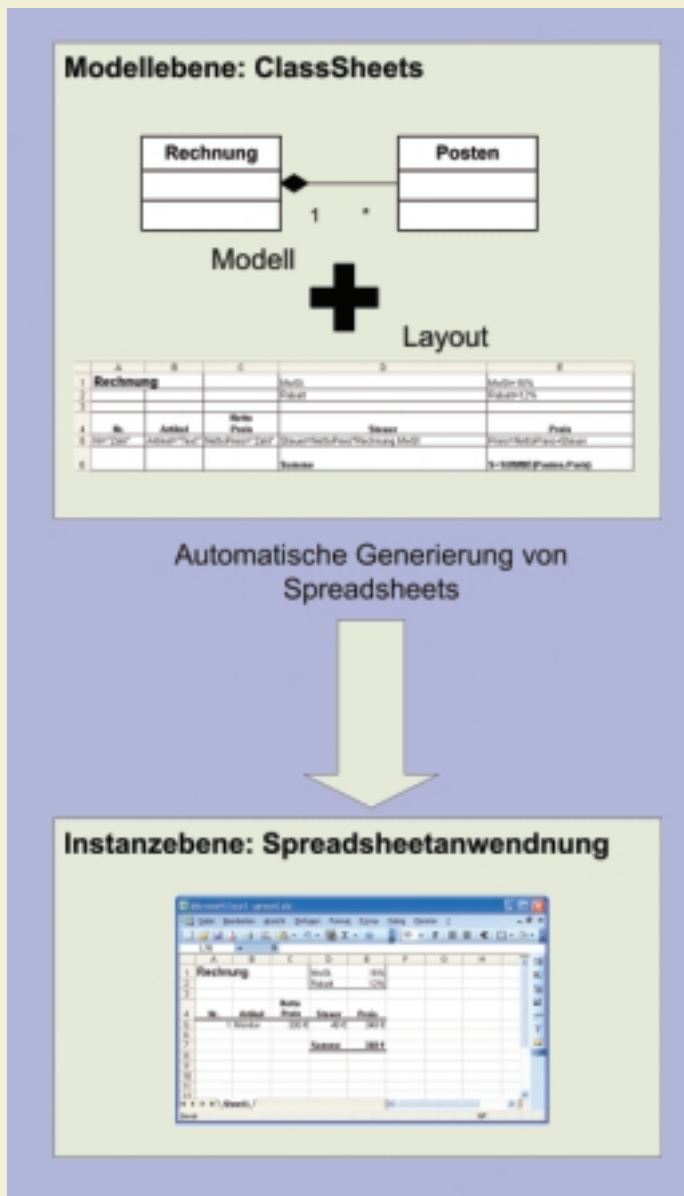


Abb. 5: Modellbasierte Entwicklung von Spreadsheet-Anwendungen.

über die Struktur der zu modellierenden Tabelle mit einem entsprechenden Editor anzugeben.

Woher kommt ein spezielles Modell für Spreadsheets?

Unter dem Namen ClassSheets wurde von Prof. Dr. Engels in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Erwig von der Oregon State University in den USA die Grundlage für ein objektorientiertes Modellieren von Tabellen geschaffen. Mit Hilfe von ClassSheets lässt sich sowohl die Struktur als auch das Layout einer Tabelle im Modell hinterlegen.

Abbildung 4 zeigt das ClassSheet für das Rechnungsbeispiel. Hier lässt sich die Objektklasse Rechnung und deren innere Objektklasse Posten deutlich erkennen. Attribute der Objektklassen werden mit Namen versehen und können somit in Formeln direkt über ihren Namen angesprochen werden (Abbildung 4).

Wie werden ClassSheets entwickelt?

Um mit derartigen ClassSheets nun Spreadsheet-Anwendungen entwickeln zu können, sind zwei Werkzeuge nötig (Abbildung 5).

Erstens wird ein Editor benötigt, mit dem ein Anwender die Struktur von Spreadsheets durch ein ClassSheet festlegen kann. Zweitens muss hieraus eine angepasste Version des Excel-Werkzeugs erzeugt werden, die nur Strukturveränderungen zulässt, die mit dem ClassSheet verträglich sind. Hierzu gehört zum Beispiel das Einfügen eines weiteren Rechnungspostens bei gleichzeitiger Anpassung der Berechnungsformeln (Abbildung 5).

Für ClassSheets wurde unter dem Namen Claos ein derartiger prototypischer Editor im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt, der es erlaubt, objektorientierte Modelle einer Tabelle auf Basis von ClassSheets zu entwerfen. Mit einem an der University of Oregon entwickelten Generierungswerkzeug GenCel kann ein ClassSheet dann direkt in Excel umgesetzt werden. Rein zellenorientierte Copy & Paste-Operationen gehören mit dieser Erweiterung der Vergangenheit an. Das Markieren eines Zellbereichs ist überflüssig, da die Strukturen schon im Modell gekennzeichnet wurden. Möchte man eine Struktur ein weiteres Mal verwenden, so kann dies direkt über einen Knopfdruck in dem angepassten Excel-Werkzeug angestoßen werden.

Was bedeutet dies für die Zukunft von Excel?

Wenn sich ein derartiger ClassSheet-Editor in der Praxis bewährt und vom typischen Excel-Nutzer angenommen wird, so ist es durchaus denkbar, dass die objektorientierte Modellierung eines Tages direkt in Excel integriert wird und die Arbeit mit Tabellen an vielen Stellen vereinfacht und sicherer macht. Insbesondere könnten viele typische Fehler in Spreadsheet-Berechnungen damit vermieden werden.

Nur ein Beispiel für eine Verbesserung von Software-Qualitäten

Die hier beschriebenen Ergebnisse der Verbesserung der Qualität von Spreadsheet-Anwendungen zeigen, wie allgemeine Erkenntnisse der Disziplin Software Engineering – hier die objektorientierte Modellierung – genutzt werden können, um einen Anwender bei der Entwicklung von Software zu unterstützen. Spreadsheet-Anwender stehen hier als Beispiel für die stets wachsende Gruppe von Fachleuten, die in ihrem Fachgebiet spezielle Software für überschaubare Problemstellungen entwickeln. Durch die stets steigende Verbreitung von Software in speziellen Fachgebieten, entwickeln immer mehr Anwender beziehungsweise Experten in ihrem Anwendungsgebiet Software. Als Beispiel seien hier etwa Ingenieure im Bereich der automatisierten Softwareentwicklung genannt. Auch hier sind modellbasierte Entwicklungsprozesse nötig, um letztendlich Software von hoher Qualität zu erzeugen.

Dieser Beitrag mit dem Titel „Software-Qualität – überall“ zeigt somit, dass Qualitätssicherung bei der Erstellung von Software für jeden von uns ein wichtiges Thema ist. Neben der hier erläuterten Softwareentwicklung durch Anwender gilt dies natürlich umso mehr für die professionelle Softwareentwicklung.

Die Entwicklung von neuartigen, praxisnahen Ansätzen zur Verbesserung der Qualität von Software steht im Mittelpunkt des an der Universität Paderborn im Bereich der Informatik existierenden s-lab (Software Quality Lab, <http://www.s-lab.upb.de>). Mit fünf Professoren aus dem Bereich Software Engineering des Instituts für Informatik und bisher sechs Indus-

trieunternehmen wurde ein Multi-PPP, also ein Private-Public-Partnership-Institut mit mehreren Industriepartnern, gegründet. Ziel ist, in gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekten neuartige Konzepte, Sprachen, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, um die Qualität der Softwareentwicklungsprozesse und letztendlich Softwareprodukte zu verbessern.

Literatur

Bals, J. & Christ, F. (2006), 'ClassSheets – modellbasierter, werkzeuggestützter Entwurf von Spreadsheet-Anwendungen', Diplomarbeit, Universität Paderborn.

Engels, G. & Erwig, M. (2005), 'ClassSheets: Automatic Generation of Spreadsheet Applications from Object Oriented Specifications', 20th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering.

Engels, G.; Gehrke, M. & Sauer, S. (2006), 'Multi-Private Public Partnership (MPPP) – Softwaretechnik auf dem Weg in die Industrie', Tagungsband Informatik 2006, Dresden.



Stefan Sauer ist Senior Researcher und Geschäftsführer des Software Quality Lab (s-lab). Seine Arbeitsschwerpunkte sind modellbasierte und modellgetriebene Softwareentwicklung, die Unified Modeling Language (UML) und domänenspezifische Modellierungssprachen. Er ist Projektverantwortlicher im s-lab für die Themen Web-basierte Systeme, serviceorientierte Architekturen, betriebliche Informationssysteme und Anwendungen.



Jan-Christopher Bals hat Informatik an der Universität Paderborn und der TU Berlin studiert. Seine Interessen liegen in den Bereichen Open Source und modellbasierte Softwareentwicklung. Zurzeit ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im s-lab und in einem von der Industrie geförderten Projekt zum Thema Open Source Stacks tätig.

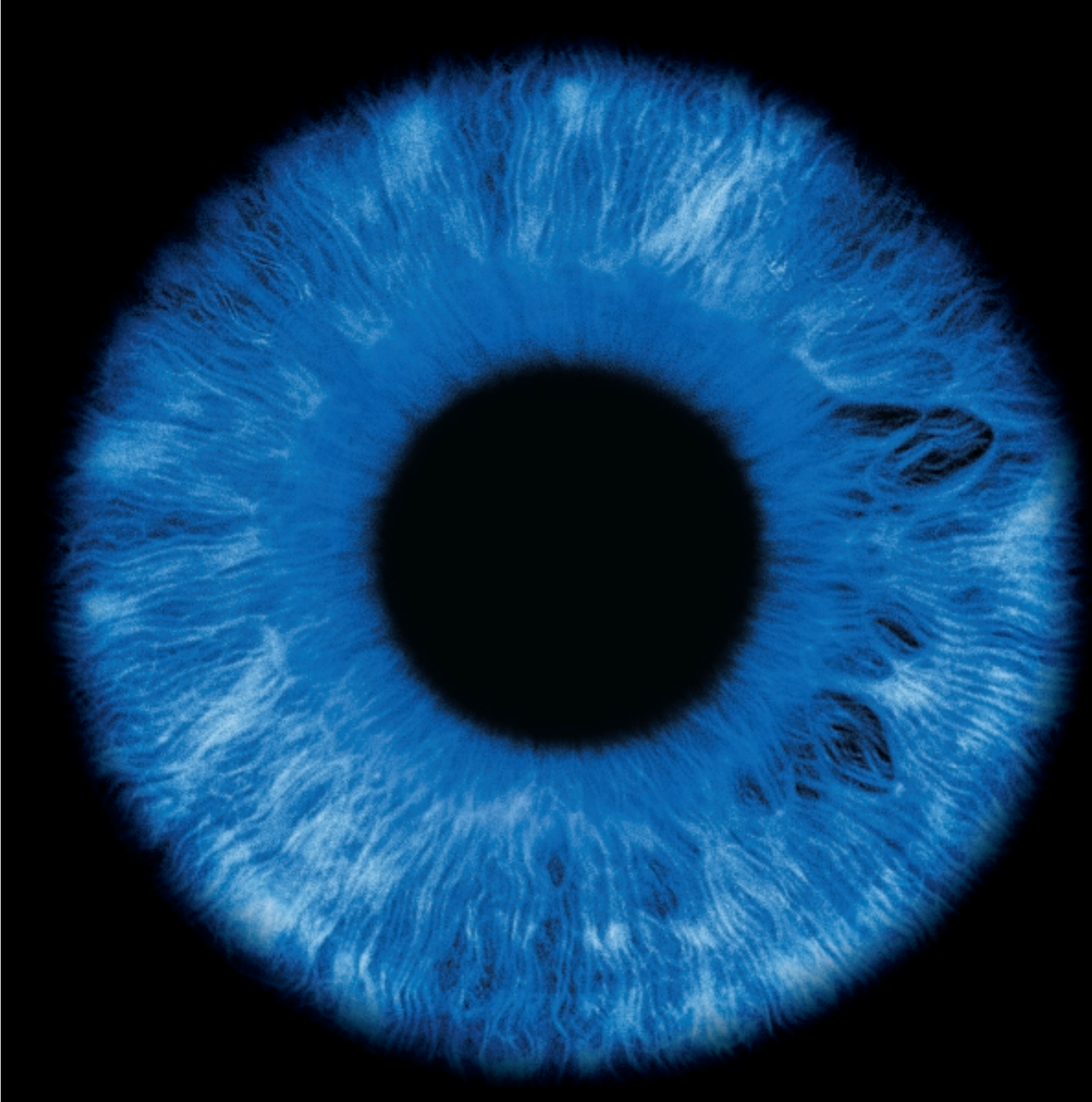


Fabian Christ hat Informatik an der Universität Paderborn und der TU Berlin studiert. Seine Interessen liegen in den Bereichen Open Source und modellbasierte Softwareentwicklung. Zurzeit ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im s-lab und in einem von der Industrie geförderten Projekt zum Thema Open Source Stacks tätig.

Kontakt: Prof. Dr. rer. nat. Gregor Engels

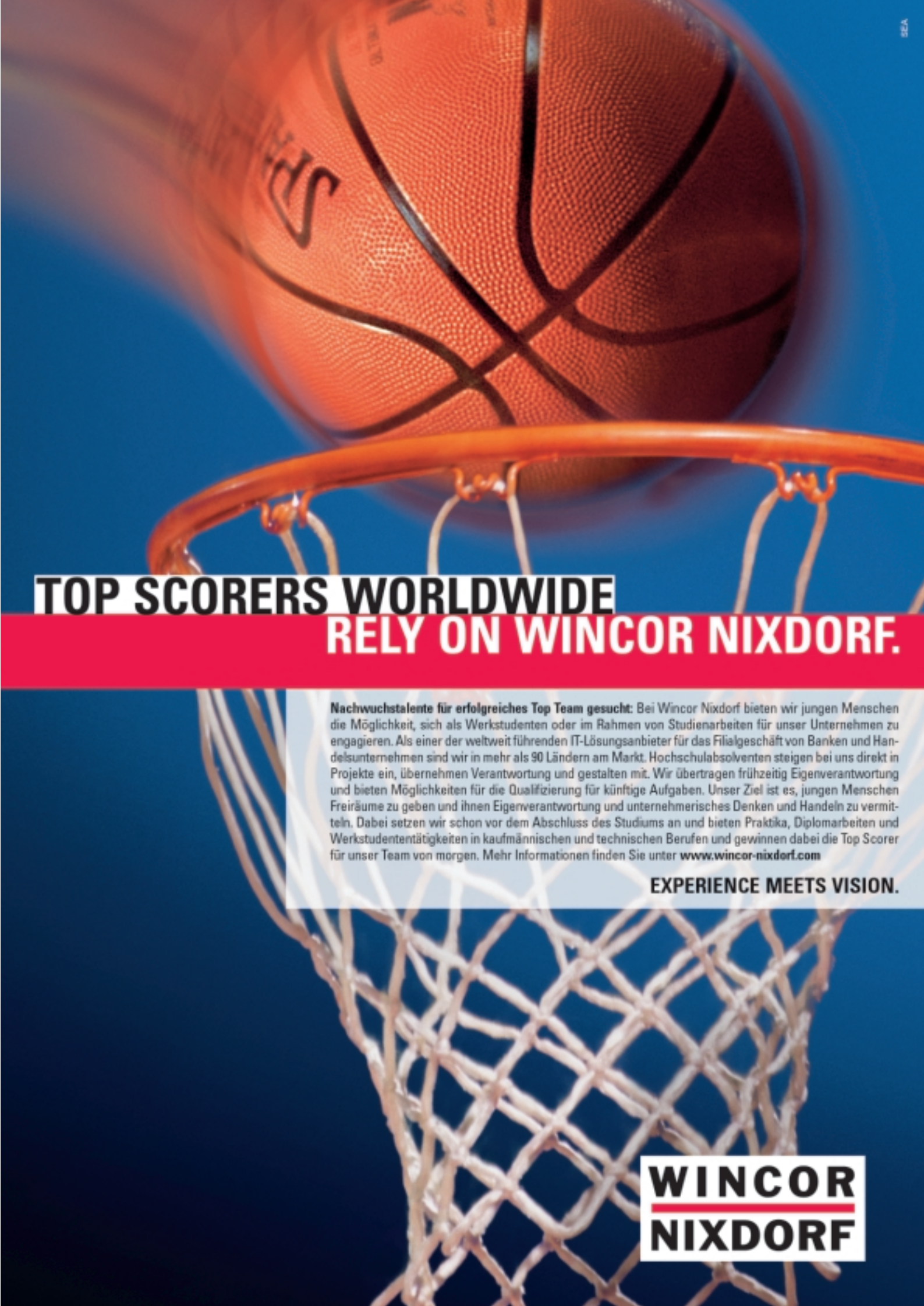
Tel.: 05251/60 3336

E-Mail: engels@upb.de



P A D A
Kreatives Handels - Marketing

Heierswall 2 • 33098 Paderborn • Telefon: 05251 / 527577



TOP SCORERS WORLDWIDE RELY ON WINCOR NIXDORF.

Nachwuchstalente für erfolgreiches Top Team gesucht: Bei Wincor Nixdorf bieten wir jungen Menschen die Möglichkeit, sich als Werkstudenten oder im Rahmen von Studienarbeiten für unser Unternehmen zu engagieren. Als einer der weltweit führenden IT-Lösungsanbieter für das Filialgeschäft von Banken und Handelsunternehmen sind wir in mehr als 90 Ländern am Markt. Hochschulabsolventen steigen bei uns direkt in Projekte ein, übernehmen Verantwortung und gestalten mit. Wir übertragen frühzeitig Eigenverantwortung und bieten Möglichkeiten für die Qualifizierung für künftige Aufgaben. Unser Ziel ist es, jungen Menschen Freiräume zu geben und ihnen Eigenverantwortung und unternehmerisches Denken und Handeln zu vermitteln. Dabei setzen wir schon vor dem Abschluss des Studiums an und bieten Praktika, Diplomarbeiten und Werkstudententätigkeiten in kaufmännischen und technischen Berufen und gewinnen dabei die Top Scorer für unser Team von morgen. Mehr Informationen finden Sie unter www.wincor-nixdorf.com

EXPERIENCE MEETS VISION.

WINCOR
NIXDORF