

# FORSCHUNGS FORUM

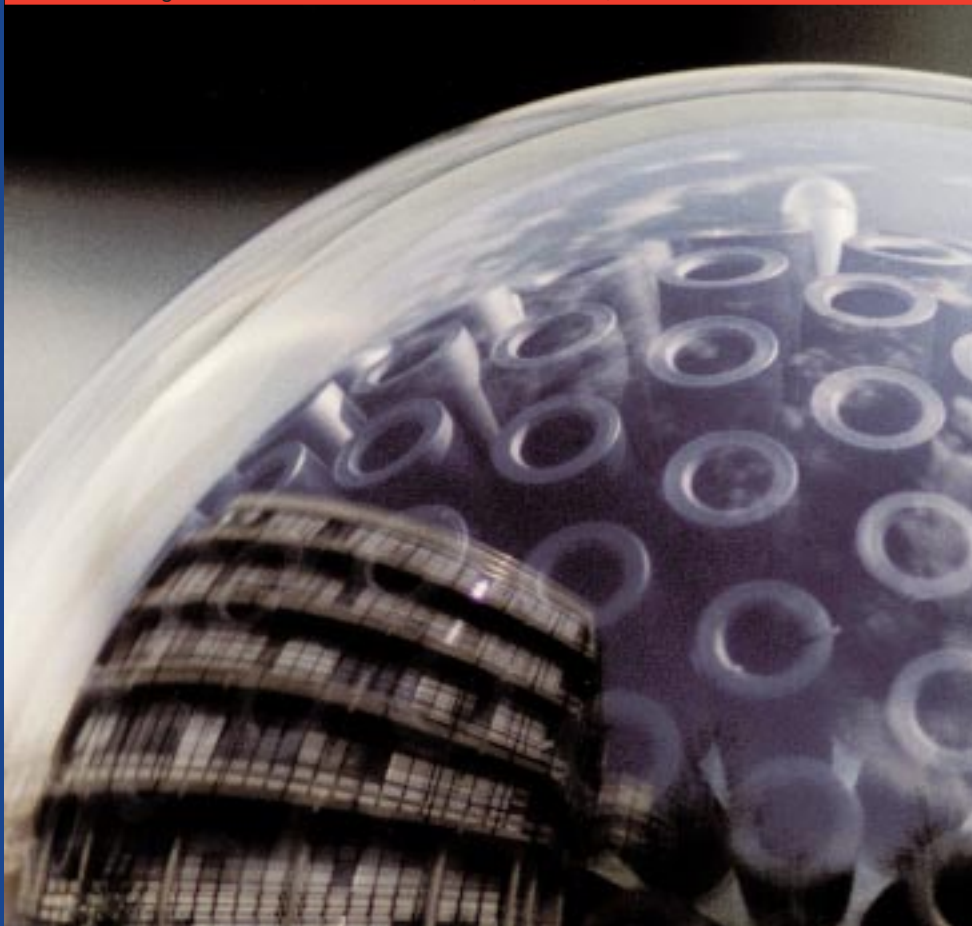
**PADERBORN**



Paderborner Universitätsmagazin

2-1999

Mit Beiträgen aus Paderborn, Höxter, Meschede und Soest



- Clever die Sonne nutzen
- "Global Change" in Afrika
- Neue Diagnostik für das Schlaflabor
- Optoelektronik im blauen Spektralbereich
- Biomechanik mit moderner Computertechnik
- Der Jahrtausendfehler und seine Rechtsfolgen



## Vorbemerkung der Redaktion

Es hat sich gelohnt!

Vor einem Jahr – wir feierten das 25-jährige Bestehen der Universität – erschien das „ForschungsForum Paderborn“ zum ersten Mal. Es war dringend erforderlich, nicht nur Forschung zu betreiben, sondern auch über angesehene Forschung in Paderborn zu berichten. Gerade in einer Zeit, in der die Hochschulen untereinander im Wettbewerb stehen, muss gelten: Leiste Gutes und schreibe darüber! In der Lehre eine Spitzenstellung einnehmen, in der Forschung ein unverwechselbares Profil zeigen und gemeinsam mit Wirtschaftsunternehmen innovative Forschungsprojekte bearbeiten – diese Richtung hat unsere Universität bereits eingeschlagen.

Die Weiterführung des Paderborner Wissenschaftsmagazins wollten wir, liebe Leserinnen und Leser, auch von Ihrer Resonanz auf unsere Form der Forschungsberichterstattung abhängig machen. Wir waren an Ihrer Meinung über das Magazin interessiert, und Sie haben uns nicht im Unklaren darüber gelassen. Unsere Antwort auf Ihr durchweg positives Urteil ist das vorliegende zweite ForschungsForum. Und noch eine gute Nachricht: Zunächst nur als ein Bonbon zum Jubiläum gedacht, ist das Paderborner Universitätsmagazin jetzt ein fester Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit unserer Hochschule. Jeweils im Wintersemester erscheint eine weitere Ausgabe mit vielversprechenden Aufsätzen, die wiederum nur einen Ausschnitt aus dem großen Fundus der Paderborner Wissenschaft und Forschung offerieren. Im aktuellen Forum weisen die Themen große Vielseitigkeit auf, besitzen einen hohen Praxisbezug und sind auch für Nichtfachleute weitgehend verständlich geschrieben.

Um das Prinzip der Wirtschaftlichkeit zu garantieren, wird die Herstellung dieser und aller folgenden Ausgaben des „ForschungsForum Paderborn“ überwiegend durch Anzeigen finanziert. Wir danken daher allen Firmen und Organisationen, die unser Projekt unterstützen.

Übrigens: Wir sind auch weiterhin sehr an Ihrer Meinung interessiert.

*Ihre Ramona Wiesner  
Referentin für Öffentlichkeitsarbeit*

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Der Rektor der Universität Paderborn,  
Prof. Dr. Wolfgang Weber

### Konzeption und Redaktion

Ramona Wiesner, Referentin für Öffentlichkeitsarbeit

Referat Hochschulmarketing und Universitätszeitschrift

Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Tel.: 05251/60 2553, 3880

E-Mail: [wiesner@zv.uni-paderborn.de](mailto:wiesner@zv.uni-paderborn.de)

<http://hrz.uni-paderborn.de/hochschulmarketing>

### ForschungsForum Paderborn (ffp) im Internet

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

### Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Gitta Domik

Prof. Dr. Wilfried B. Holzapfel

Prof. Dr. Jörg Jarnut

Prof. Dr. Klaus Meerkötter

Prof. Dr. Winfried Reiß

Prof. Dr. Heinrich Schulte-Sienbeck

Prof. Dr. Jürgen Voß

### Drucklegung

November 1998

ISSN (Print) 1435-3709

### Layout

PADA-Werbeagentur

Heierswall 2, 33098 Paderborn

### Druck und Anzeigenkauf

Bonifatius GmbH, Druck-Buch-Verlag, 33100 Paderborn

### Auflage

5 000

## Titel

Der Solar-Igel, ein neuartiger Sensor zur Messung der Solareinstrahlung für technische Anwendungen, Fachbereich 14/Elektrotechnik (ab Seite 22).

Seite 6

**POLDI – neue Entwicklungen für die Diagnostik im Schlaflabor**

*Diagnosehilfen für den Arzt – Erleichterungen für die Patienten*  
Dieter Barschdorff



Seite 12

**„Global Change“ in Afrika**  
*Sedimentanalysen und Kohlenstoffisotope entschlüsseln die Umweltgeschichte tropischer Ökosysteme*  
Jürgen Runge



Seite 16

**Clever die Sonne nutzen**  
*Einstrahlungsmessungen mit dem Solar-Igel*  
Michael Gruffke, Egon Ortjohann



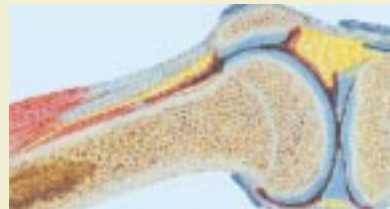
Seite 20

**Dreidimensionale Welten auf flachen Bildschirmen**  
*Ein Preis-Leistungs-Vergleich von Darstellungstechniken*  
Gitta Domik, Sabine Volbracht



Seite 26

**Biomechanik – der Mechanik der Natur auf der Spur**  
*Simulation von Bewegungen und Beanspruchungen des menschlichen Bewegungsapparates mit Hilfe modernster Computertechnik*  
Hans Albert Richard, Gunter Kullmer



Seite 30

**The Millenium-Bug**  
*Software-Haftungsrisiken zu Beginn des neuen Jahrtausends*  
Michael Barton



Seite 34

**Sozio-ökonomische Analyse der Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland**  
*Was bringt eine Fußball-WM für den Standort Deutschland?*  
Markus Kurscheidt, Bernd Rahmann



Seite 40

**Sex, Musik und Schach**

*Editionsprojekt Johann Jakob Wilhelm Heinse  
(1746-1803) am Musikwissenschaftlichen  
Seminar Detmold*

Werner Keil

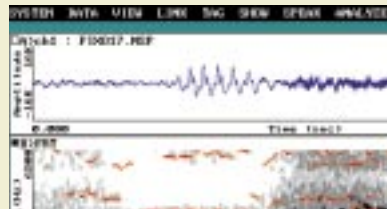


Seite 44

**„Zeig mir, wie du sprichst,  
und ich sag dir, wer du bist“**

*Zum Verhältnis von Sprachgebrauch und  
Identität in mehrsprachigen Gemeinschaften*

Johannes Kabatek



Seite 48

**Paderborn droht im Müll zu versinken**

*Wie kann die Stadt das wachsende  
Abfallaufkommen bewältigen?*

Franz-Josef Kaiser, Volker Brettschneider



Seite 52

**Optoelektronik im blauen Spektralbereich**

*Halbleiterlaser für blaues Licht soll  
Kapazität von Datenspeichern erhöhen*

Klaus Lischka

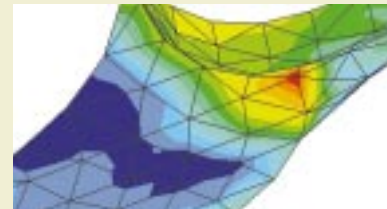


Seite 56

**Bruchmechanik an Materialgrenzflächen**

*Beispiel eines gelungenen Transfers von  
Grundlagenforschung in die industrielle Praxis*

Klaus Herrmann, Wolfgang H. Müller



Seite 62

**Mit Radiotracer-Methoden  
auf den Spuren von Rüstungsaltslasten**

*Radioaktive Isotope ermöglichen  
die Verfolgung des TNT-Abbaus*

Gregor Fels



Seite 66

**Primzahlzwillingsrekorde –  
nicht nur eine Jagd nach Monstern**

*Sehr schnelles Rechnen mit sehr großen Zahlen*

Karl-Heinz Indlekofer







Vorwort

Die noch vor einigen Monaten befürchtete Zweiteilung der Universitätslandschaft in Forschungs- und Lehruniversitäten steht wohl zur Zeit nicht mehr zur Diskussion. Allerdings gibt es auf politischer Ebene Bestrebungen, die in den kommenden Jahren zu erwartende Nachfrage nach universitären Studienplätzen vor allem im naturwissenschaftlich-technischen Bereich durch Einführung sogenannter Lehrprofessuren zu bewältigen. In der Praxis bedeutet offenbar aber auch dies eine Aufweichung des Humboldtschen Prinzips der Einheit von Forschung und Lehre. Ein Hochschullehrer, der von vornherein bereit ist, auf eigene Forschungstätigkeit zu verzichten, oder hierzu bereit sein muss, wird nur schwerlich in der Lage sein, in seinen Studierenden die notwendige wissenschaftliche Neugier zu wecken und sie zu selbstständiger wissenschaftlicher Arbeit anzuregen. Das häufig zu hörende Argument, dass dieses Ziel bei dem Gros der Studierenden an den Universitäten gar nicht verfolgt werden müsse und eine stärkere berufsfeldorientierte Ausbildung nötig sei, ist indes nicht überzeugend. Möglicherweise führt ein weniger grundlagenorientiertes und stärker auf die Praxis zugeschnittenes Studium zu einer Qualifikation der Absolventen, die den aktuellen Berufseinstieg zunächst erleichtert. Die fehlende Kompetenz im Bereich des Grundlagenwissens macht sich aber erfahrungsgemäß bei den sich ständig verändernden Anforderungen im Berufsleben nach wenigen Jahren negativ bemerkbar. Dies gilt natürlich insbesondere im naturwissenschaftlich-technischen Bereich, aber nicht nur dort. Die meisten Universitätsabsolventen werden schon nach wenigen Jahren in ihrem Berufsleben mit Aufgaben konfrontiert, denen sie im Studium niemals begegnet sind. Die Erfahrung lehrt aber, dass solide Kenntnisse der Grundlagen und der einschlägigen wissenschaftlichen Methoden die beste Garantie dafür sind, dass auch diese Aufgaben gemeistert werden können.

Um in jungen Leuten die Begeisterung für die Wissenschaft zu wecken, bedarf es Forscherinnen und Forscher, die selbst von der Wissenschaft begeistert sind und den Drang verspüren, ihre neuen Erkenntnisse den Studierenden zu vermitteln. Aufgrund der hohen Spezialisierung wird es zwar häufig nicht möglich sein, die Studierenden mit jedem Detail einer Forschungsarbeit vertraut zu machen. Dennoch sollte der Universitätslehrer stets bemüht sein, auch Studierende in seine Forschungsarbeiten mit einzubeziehen. Darüber hinaus sollte er gelegentlich seine Forschungsergebnisse auch so darstellen, dass er nicht nur in seiner *Community* verstanden wird, sondern auch von Wissenschaftlern aus anderen Disziplinen und einer interessierten Öffentlichkeit.

*Klaus Meerkötter*

*Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs*



# POLDI – neue Entwicklungen für die Diagnostik im Schlaflabor

*Diagnosehilfen für den Arzt – Erleichterungen für die Patienten*

Atemstörungen während des Schlafens stellen für Kinder und Erwachsene ein Gesundheitsrisiko dar. Vor allem obstruktive Schlafapnoen beeinflussen das Herz-Kreislaufsystem. Sie können ständige Müdigkeit und sogar Herzrhythmusstörungen verursachen. Bei Neugeborenen betrachtet man Atemregulationsstörungen während des Schlafes als eine der Ursachen des „Plötzlichen Kindstods“. Mit dem Paderborner POLysomnographischen DIagnosesystem (POLDI) werden im Schlaflabor elektrophysiologische Signale gemessen und ausgewertet.

## Wozu dient ein Schlaflabor?

„Menschen wie Götter beugen sich in Ergebenheit vor dem Schlaf“, sagte schon Homer (8. Jh. v. Chr.). Auch Platon (427 bis 347 v. Chr.) dachte über den Schlaf nach und betrachtete die Isolierung des Gehirns vom übrigen Körper als Ursache des



Abb. 1: Tragbares Polysomnographie-Komplettgerät mit Sensorik (nach Unterlagen der Firma MAP, Martinsried).

Quelle: Braun, HNF



**Prof. Dr. Ing. habil. Dieter Barschdorff** ist seit 1979 Professor für Elektrische Meßtechnik im Fachbereich 14/Elektrotechnik der Universität Paderborn. Arbeitsgebiete sind Digitale Signalverarbeitung, Technische Fehlerdiagnose und Biomedizinische Meßverfahren.

Schlafes, bewirkt durch Dämpfe, die aus dem Magen aufsteigen und die Poren des Gehirns blockieren. Aristoteles (384 bis 322 v. Chr.) hielt dagegen das Herz für das sensorische Zentrum des Körpers und glaubte, die Abkühlung des Herzens sei die Ursache für den Schlaf. Er schilderte das Einschlafen, wobei er annahm, daß die beim Verdauen der Nahrung aus dem Magen aufsteigenden Dämpfe im kühleren Gehirn kondensieren, nach unten strömen und das Herz abkühlen. Dies war naheliegend, weil der Schlaf nach einer schweren Mahlzeit, die zweifellos mehr Dämpfe erzeugte, tief und besonders lang war, was natürlich mit unserer Erfahrung übereinstimmt.

Erst Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigte sich die Wissenschaft eingehender mit dem Schlaf. Die Entdeckung der Hirnströme (1875) bei direktem Aufsetzen von Elektroden auf freigelegte Gehirne von Tieren brachte die entscheidende Wende in der Erforschung des Nervensystems und des Schlafes. Allerdings konnte der deutsche Psychologe *Berger* erst 1925 elektrische Gehirnströme auch durch außen am Kopf aufgesetzte Elektroden nachweisen. Er bezeichnete die Registrierung als Elektroenzephalogramm (EEG). *Kleitman und Aserinsky* berichteten 1953 erstmals über das Auftreten schneller Augenbewegungen während des Schlafes und die damit verbundene Traumphase. Sie bezeichneten diese Art des Schlafes als REM-Schlaf (englisch: rapid eye movement). Weitere Untersuchungen in den 60er Jahren führten zur Entdeckung ausgeprägter Schlafphasen.

Ein- und Durchschlafstörungen, spontane Atemstillstände (Apnoe) und insbesondere die sogenannten obstruktiven (obstruktiv = verstopfend) Schlafapnoen wirken sich nachteilig auf das Herz-Kreislaufsystem und das allgemeine Wohlbefinden aus. Bei Erwachsenen untersucht man daher diese Symptome, aber auch Herzrhythmusstörungen, Müdigkeit und Abgeschlagenheit, Schnarchen und vor allem die Häufigkeit des Auftretens obstruktiver Schlafapnoen durch Messungen physiologischer Größen während des Schlafes. Auch bei Säuglingen und Klein-





Abb. 2: Säugling mit Sensorik im Schlaflabor (rot, im Bereich der Luftröhre: Trachea-Mikrofon)

kindern diagnostiziert man in dieser Weise Atemregulationsstörungen, Hirnfunktions- und Hirnreifungsstörungen sowie das Risiko für den plötzlichen Kindstod (auch als SIDS: sudden infant death syndrome bezeichnet).

Unser Empfinden bezüglich der Häufigkeit und Dauer des Schlafes ist subjektiv. Nach einem Schläfchen von wenigen Minuten haben wir manchmal das Gefühl, als hätten wir stundenlang geschlafen. Es gibt aber auch Menschen, die nach acht bis zehn Stunden Schlaf wach werden und überzeugt sind, sie hätten nur ein Nickerchen gehalten. Die Unfähigkeit, Länge und Tiefe des Schlafes selbst abschätzen zu können, ist eine der Hauptschwierigkeiten bei der Beurteilung von Schlafstörungen durch den Patienten. Zuverlässige und objektive Diagnosen basieren daher heute auf der Polysomnographie, also der Aufzeichnung und Analyse physiologischer Meßgrößen im Schlaflabor.

### Polysomnographie

In der Anfangszeit der Schlafforschung gab man einer Versuchsperson einen Stein oder einen kleinen Ball in die Hand und bat sie, die Hand aus dem Bett herauszustrecken. Der Augenblick, in dem der Gegenstand durch die Muskeler schlafung aus der Hand fiel, wurde als der Augenblick des Einschlafens ermittelt. Heute ist die Polysomnographie in einem Schlaflabor das bekannteste diagnostische Verfahren, um den Zeitpunkt des Einschlafens und den Verlauf des Schlafes zu analysieren. Dazu werden bei schlafendem Patienten zahlreiche Meßgrößen wie Atembewegungen an Brust (Thorax) und Bauch (Abdomen), der Luftfluß an Mund und Nase, Aktivitäten des Gehirns (Elektroenzephalogramm, EEG), des Herzens (Elektrokardiogramm, EKG) und der Muskeln (Elektromyogramm, EMG) sowie Blutgas- und Partialdruckwerte registriert. Die Anzahl schneller Augenbewegungen (Elektrookulogramm, EOG) dient zusammen mit dem EEG zur Kennzeichnung von Schlaf- und Traumphasen.

Die Polysomnographie ist ein sehr aufwendiges Meßverfahren. Moderne Polysomnographen werden als Kompletteräte in den unterschiedlichsten Ausführungen angeboten. Sie registrieren die Sensordaten digital und führen automatische Analysen aus. Dabei erkennen sie unterschiedliche Atemmuster wie zentrale, obstruktive oder gemischte Apnoen, Blutgasabfälle und Herzfrequenzschwankungen. Manche Geräte bestimmen auch Schlafstadien. Die Ergebnisse der automatisierten Analysen lassen sich manuell nachbessern. Mittlerweile bieten einige Geräte auch eine Kommentareingabe, eine Einbindung in ein LAN (englisch: local area network) und eine automatische Datensicherung.

Bei Säuglings- und Kinderuntersuchungen müssen die Polysomnographiesysteme von Kinderschwestern, also von nicht speziell technisch ausgebildeten Personen bedient werden. Dabei zeigten kommerzielle Geräte in der Vergangenheit Schwächen, weil sie sich nur schwer an die individuellen Bedürfnisse der Nutzer anpassen ließen. Auch die automatische Auswertung der sehr stark variierenden Signale war nicht immer zufriedenstellend. Nachteilig bei Komplettlösungen ist jedoch vor allem, daß sich Neuerungen bei der Sensorik oder der Rechner-technologie nicht ohne weiteres integrieren lassen.

Im Jahr 1991 begann die Arbeitsgruppe Elektrische Meßtechnik an der Universität Paderborn in enger Kooperation mit dem Schlaflabor der Vestischen Kinderklinik Datteln (Leitung: Prof. Dr.med. E. Trowitzsch) mit der Entwicklung eines neuartigen Polysomnographiesystems, das diese Nachteile nicht aufweist. Es ist als offenes System konzipiert, an das beliebige, in der Klinik vorhandene medizintechnische Geräte über analoge oder seriell-digitale Eingänge angeschlossen werden können.

Unser POLysomnographisches Diagnosesystem POLDI besteht aus dem mobilen Datenerfassungssystem POLDI-Connect, einer Lichtwellenleiterübertragungsstrecke, einer PC-Einschubkarte und den Windows-Programmen „POLDI-Ableitung“ zur Datenerfassung sowie „POLDI-Analyse“ zur automatischen Auswertung und Validierung der Daten. Das System berücksichtigt

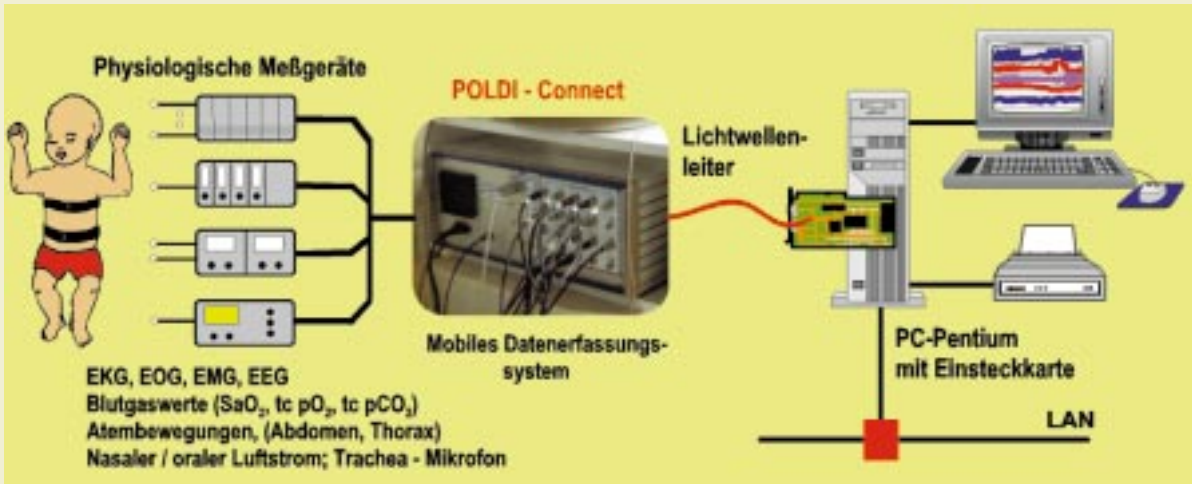


Abb. 3: POLYSomnographisches Diagnosesystem (POLDI), Elektrische Meßtechnik, Universität Paderborn.

weitestgehend die Bedürfnisse und Anforderungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Schlaflabors, bei dem in mehreren Schlafboxen gleichzeitig untersucht wird. Unsere Beiträge entstanden im Rahmen dreier Dissertationen und zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten. Sie werden zur Zeit von Dipl.-Ing. Iris Hanheide und Dipl.-Ing. Matthias Erig im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Arbeiten weiterentwickelt (Abbildung 3). Im folgenden werden neue Ansätze zur Atemmusteranalyse und zur Bestimmung von Schlafstadien, eine neuartige Apnoeerkennung, eine optoelektronische Apnoeerkennung, ein Trachea-Mikrofonsystem und ein Verfahren zur kontinuierlichen Blutdruckbestimmung erläutert.

**Atemmusteranalyse**

Mediziner treffen anhand der registrierten Größen Aussagen über physiologische Aktivitäten des Patienten wie Atempausen,

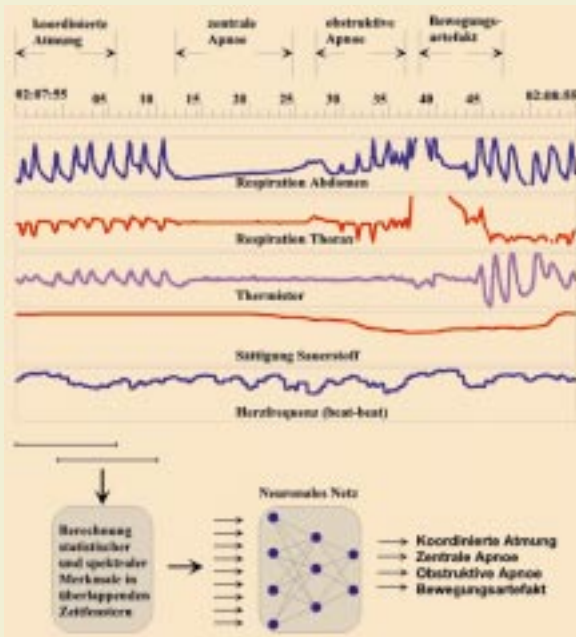


Abb. 4: Adaptive Signalauswertung mit künstlichen neuronalen Netzen (charakteristische Signalabschnitte sind markiert).

Abfälle von Blutgaswerten oder Schwankungen der Herzfrequenz. Auch die Aufeinanderfolge der Schlafstadien ist wichtig, Atmungs- und Schlafstadienanalysen werden bei der Diagnose in Beziehung gesetzt.

Das POLDI-System stützt sich bei der Atemmustererkennung erstmals auf selbstlernende, adaptive Verfahren. Dazu berechnen wir im Zeit- und Frequenzbereich aus den Registrierungen der thorakalen und abdominalen Atembewegungen und des nasalen oder oralen Luftflusses unter Beachtung der Blutsauerstoffsättigung bestimmte Signalkennwerte. Diese Kennwerte werden in Zeitabschnitten mit koordinierter Atmung und solchen mit charakteristisch ausgeprägten Atemstörungen ermittelt. Auch Zeitintervalle, in denen Artefakte (Signalstörungen) auftreten, werden berücksichtigt. Die Signale werden in zeitlich überlappenden Intervallen analysiert. Mit den so gewonnenen Kennwerten werden verschiedene künstliche neuronale Netzmodelle trainiert. Abbildung 4 zeigt schematisch die Vorgehensweise.

Nach Abschluß der Trainingsphase erkennt das System sowohl zentrale, obstruktive und gemischte Apnoen sowie periodische und paradoxe Atmung (Schaukelatmung) als auch Signalbereiche mit Artefakten, die keine Auswertung zulassen. Signalstörungen können durch plötzliche Bewegungen, starkes Schwitzen, Husten oder Seufzen und durch gelöste Sensorkabelverbindungen entstehen.

Der adaptive Algorithmus hat sich nach Abschluß der Trainingsphase, die Ableitungen von zahlreichen Patienten umfaßt, an den Verlauf der Zustandsgrößen angepaßt. Das neuronale Modell liefert Abbildungsvorschriften zwischen den Signalkennwerten und den physiologischen Kreislaufparametern. Man kann es mit weiteren aussagekräftigen Signalabschnitten nachtrainieren. Bei einer automatischen Auswertung liegen die Erkennungs-raten über 80 Prozent. Die automatischen Rechneranalysen werden von Medizinern mit Hilfe einer leicht erlernbaren und einfach zu bedienenden Editierhilfe überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

**Schlafstadien**

Bei Erwachsenen sind definierte Schlafstadien bekannt, die sich mehrmals während der Nacht wiederholen. Ihre Abfolge hat für die Erholung des Körpers eine große Bedeutung. Bei Säuglingen und Kleinkindern beeinflussen die unterschiedlichen Schlaf-

stadien die strukturelle Entwicklung des Gehirns in der frühen Lebensphase. Der Schlaf ist auch für die aktive Verarbeitung und Speicherung von Informationen, die im Wachzustand aufgenommen wurden, wichtig. Das programmierte Instinktverhalten wird ebenfalls durch den Schlaf günstig beeinflusst.

Heute bestimmt man unterschiedliche Schlafstadien fast ausschließlich durch Analyse des EEGs und betrachtet dazu sowohl bei der visuellen als auch bei der automatischen Auswertung Intervalle von 20 bis 30 Sekunden Länge. Die entsprechenden Kriterien für Erwachsene wurden von *Rechtschaffen und Kales* festgelegt. Man kennt vier Schlafstadien, die ebenso wie der bewußte Zustand „wach“ durch unterschiedliche Signalmuster gekennzeichnet sind. Das EEG wird dazu in vier Frequenzbereiche aufgeteilt, die man als Alpha-Band (8 bis 12 Hz), Beta-Band (13 bis 30 Hz), Theta-Band (4 bis 7 Hz) und Delta-Band (0,5 bis 3 Hz) bezeichnet. Mediziner sprechen in diesem Zusammenhang übrigens von „ $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\theta$ - und  $\delta$ -Wellen“. Ein eigenständiges Stadium stellt der Traumschlaf dar. Er ist durch schnelle Augenbewegungen, wechselnden Atemrhythmus und Schwankungen der Herzfrequenz gekennzeichnet. Das Signalmuster des EEG unterscheidet sich dabei nur unwesentlich von dem des Einschlaf- oder Wach-EEGs.

Bei einer automatischen EEG-gestützten Schlafstadienanalyse müssen charakteristische Signalformen identifiziert und die Häufigkeit ihres Auftretens gezählt werden. Zu den Signalen gehören der sogenannte *K-Komplex* (spontan oder nach äußerem Reiz auftretender Impuls hoher Amplitude von ca. 200 ms Dauer), die *Schlafspindeln* (höherfrequente Signalanteile von ca. 1 s Dauer im Verlauf niederfrequenter  $\delta$ -Wellen) und die sogenannten *Vertex-Wellen* (einmaliges, ausgeprägtes Überschwingen mit einer Dauer von ca. 100 ms). Mit der im Säuglingsschlaflabor erreichbaren Signalqualität (s. Abbildung 4) analysiert das POLDI-System Schlafstadien unter Beachtung der für Säuglinge und Kleinkinder gültigen Kriterien weitgehend automatisch. Dabei wird die zeitliche Entwicklung des Körpers und insbeson-

dere die des Gehirns beachtet, die bis zum zweiten Lebensjahr die Anteile von Tiefschlaf- und Traumphasen bestimmt. Die Einteilung des Schlafes im ersten Lebensjahr ist auch heute noch Gegenstand der Forschung. Berücksichtigt man die neurophysiologischen Parameter und die motorischen Aktivitäten, so lassen sich bei Säuglingen drei Schlafstadien erkennen: Leichtschlaf, Tiefschlaf und REM-Schlaf. Das folgende Diagramm zeigt die visuell am EEG-Bildschirm im Vergleich zu den automatisch durch POLDI bestimmten Schlafstadien (Hypnogramm) eines fünf Monate alten Säuglings, s. Abbildung 5.

Im Rahmen der Dissertation Gerhardt wurden neue, auf Mustererkennungsverfahren basierende Algorithmen entwickelt. Neben den Effektivwerten des  $\delta$ - und  $\beta$ -Bandes werden die Anzahl der schnellen Augenbewegungen (REM) und die Herzfrequenzvariabilität (HRV) berücksichtigt. Mit diesen Merkmalen und einem neuronalen Netz wird ein Hypnogramm erstellt, das ebenfalls editiert werden kann. Das POLDI-System liefert in der klinischen Praxis Hypnogramme, die gut mit den manuell-visuell erstellten Diagrammen übereinstimmen, s. Abbildung 5. Bei unseren neuen Entwicklungen werden wir die typischen Änderungen der Atemfrequenz in der REM-Phase berücksichtigen. Außerdem bemüht man sich heute, die Mikrostruktur des Schlafes zu erforschen. So ist bekannt, daß beim Übergang von einer mittleren zu einer Tiefschlafphase zehn und mehr Minuten vergehen können. Die Übergänge zwischen den einzelnen Schlafphasen müssen daher im Hypnogramm mit höherer Zeitauflösung dargestellt werden als bisher üblich.

### Apnoeskalierung

Mediziner beschreiben die Apnoe-Häufigkeit während des Schlafs durch verschiedene Kennwerte. Meist wird die Summe der Zeitdauer obstruktiver und zentraler Apnoen auf die gesamte Schlafdauer bezogen (Apnoe-Index). Mit Hilfe dieser statistischen Kennzahlen kann man Aussagen über die Apnoebelastung während einer Nacht machen. Bei einer typischen Untersuchung

müssen oft Hunderte von Apnoen visuell bewertet werden. Dies erfordert eine erhebliche Konzentration. In Zusammenarbeit mit den Medizinern des Schlaflabors haben wir einen Apnoe-Skalierungsfaktor (ASF) entwickelt, der die Schwere von Atemstillständen automatisch bewertet. Das Expertenwissen mußte dazu in einen mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Eine Apnoe wird um so schwerer bewertet, je länger sie dauert, je länger

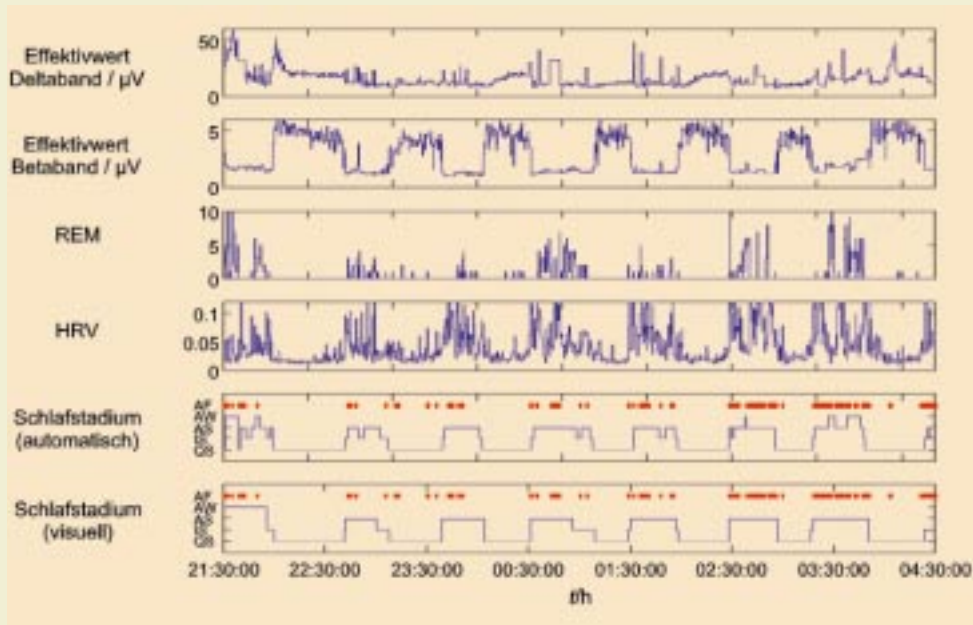


Abb. 5: Hypnogramm eines fünf Monate alten Säuglings (aus [6]).



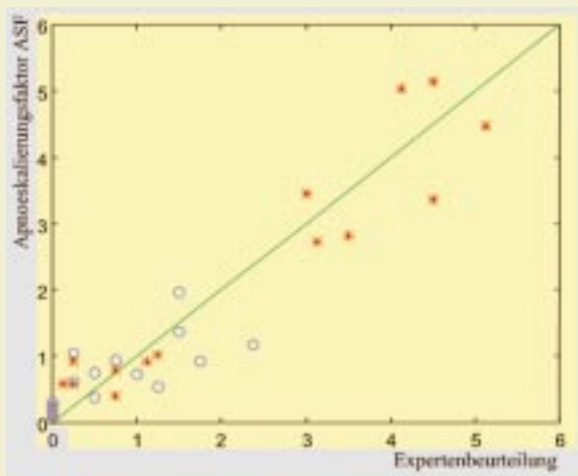


Abb. 6: Korrelation zwischen berechnetem Apnoeskalierungsfaktor (ASF) und der Expertenbeurteilung (o Kontrollkinder, \* Risikokinder, aus [3]).

der obstruktive Anteil ist, je größer der Abfall der Sauerstoffsättigung ist und je größer die Abweichung der Herzfrequenz vom Durchschnittswert im Bereich der Apnoe ist. In der Lernphase wurden 32 Apnoen unterschiedlicher Zeitdauer bei 9 Säuglingen mit bronchopulmonarer Dysplasie (Dysplasie = Unterentwicklung) und bei 11 Säuglingen ohne Befund von medizinischen Experten hinsichtlich ihres Schweregrades beurteilt. Abbildung 6 zeigt die Korrelation zwischen den durch POLDI berechneten ASF-Zahlenwerten und der Expertenbeurteilung des Schweregrades zentraler und obstruktiver Apnoen.

In unseren ersten Feldstudien gelang es, Risikokinder und Kontrollkinder (gleiches Alter und Gewicht, aber ohne Befund) mit häufig auftretenden Atemstörungen zu unterscheiden (s. Abbildung 6). Der Apnoeskalierungsfaktor liefert einen gleichbleibenden Maßstab zur Bewertung von Atemstörungen. Er erlaubt dem zuständigen Mediziner eine wesentlich schnellere und exaktere Analyse als bei empirischem Vorgehen.

**Photoplethysmographische Atemanalyse**

Optoelektronische Sensoren, basierend auf der Absorption infraroter Strahlung im nahen IR-Bereich, werden bei der Bestim-

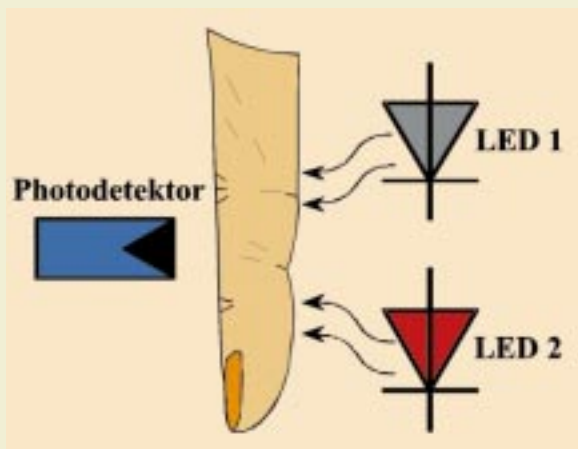


Abb. 7: Infrarot-Absorptionssensor für die Messung der Sauerstoffsättigung (schematisch).

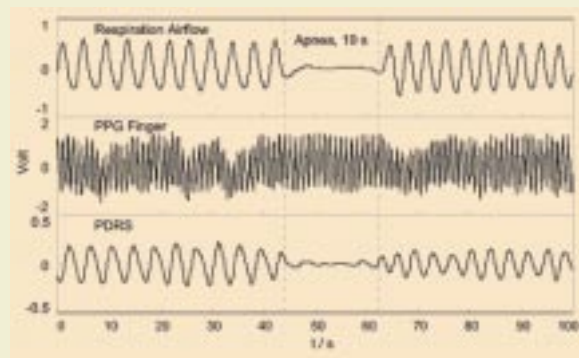


Abb. 8: Gegenüberstellung von Thermistor-Atemsignal (oben), Infrarot-Absorptionssignal (Mitte) sowie Ausgangssignal des Modells (unten) bei zentraler Apnoe (aus [7]).

mung der Sauerstoffsättigung und bei der Venendiagnostik eingesetzt. Abbildung 7 zeigt schematisch eine Sensoranordnung für zwei Wellenlängen zur Messung an einem Finger.

Die physiologische Grundlage für eine neue Sensorik zur Atemanalyse bilden die als Sinusarrhythmie bezeichneten Änderungen der Herzfrequenz sowie die Schwankung des Blutdruckes beim Ein- und Ausatmen. Mit einer modellgestützten Auswertung der optoelektronischen (photoplethysmographischen) Signale lassen sich zentrale Apnoen sowohl im Simulationsversuch bei Erwachsenen als auch bei Säuglingen während des Schlafes nachweisen. Abbildung 8 zeigt einen typischen Signalverlauf bei zentraler Apnoe.

Die Signale werden dazu einerseits modellgestützt gefiltert und im Zeitbereich dargestellt (s. Abbildung 8), andererseits lassen sich Atemfrequenzänderungen als Frequenz - Zeitdarstellungen (Wigner-Transformation) berechnen und sichtbar machen. Diese Verfahren ermöglichen ein eindeutiges Erkennen zentraler Atemstillstände mit einer sehr einfachen Sensorik.

**Trachea-Mikrofonsystem**

Durch ein im Bereich der Luftröhre angebrachtes Mikrophon lassen sich Atemgeräusch und Herzfrequenz messen. Im Rahmen unserer Untersuchungen haben wir ein neuartiges Doppelmikrophon mit einer Störgeräuschkämpfung (Adaptivfilterverfahren) entwickelt. Mit diesem Mikrofonsensor läßt sich die Atemtätigkeit ebenso nachweisen, wie mit einem Mund/Nasenthermistor als Temperaturfühler. Das Mikrophon wird aber von Säuglingen besser akzeptiert als ein unter der Nase angeklebter Thermistor. In Abbildung 2 ist unser Sensor im Luftröhrenbereich am Hals des Säuglings zu erkennen (rote Farbe). Obwohl sich die Mikrofon-signale bei Ein- und Ausatmen von den die Temperaturänderungen anzeigenden Thermistor-Signalen unterscheiden, läßt sich das POLDI-System so trainieren, daß auch mit dem Mikrofonsensor eine automatische Apnoeererkennung möglich ist.

**Kreislaufdynamik**

Ergänzend zu den Untersuchungen im Schlaflabor absolvieren einige Kinder einen Fahrrad-Ergometer-test. Nach Alter und Leistungsfähigkeit legt der Mediziner bestimmte Belastungsstufen fest. In einer kurzen Ruhepause werden nach Ablauf jeder Stufe der systolische und der diastolische Blutdruck mit einem Manschettenmeßgerät (Methode Riva-Rocci) bestimmt. Diese

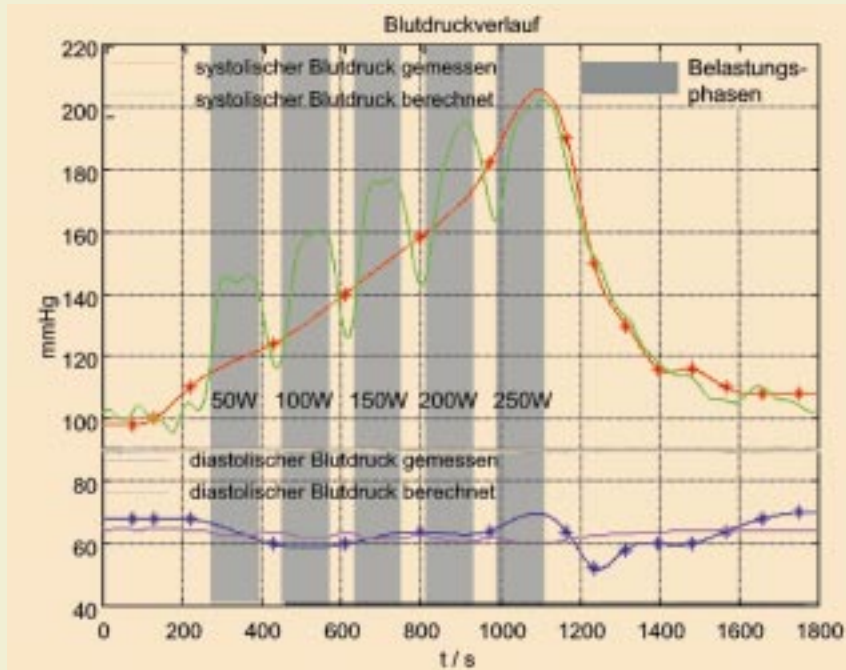


Abb. 9: Systolischer und diastolischer Blutdruck während eines Fahrrad-Ergometertests, nach [4]  
(rot: Meßwerte des Manschettenmeßgerätes, Ausgleichspolynom durch diskrete Meßpunkte; grün: über Modellansatz berechneter Druckverlauf).

Messung, bei der man die Membrane über den systolischen Druckwert aufpumpt und anschließend den Druck langsam wieder abläßt, dauert nahezu eine Minute. Während dieser Zeitspanne ändern sich jedoch Pulsfrequenz und systolischer Blutdruck. Diese Änderungen können mit der zur Zeit üblichen Meßmethode nicht erfasst werden.

Basierend auf der Abhängigkeit der Pulswellenlaufzeit vom Blutdruck im Arteriensystem entwickeln wir ein neuartiges Meßverfahren, mit dem systolischer und diastolischer Blutdruck über einen Modellansatz in Echtzeit bestimmt werden können. Die Pulswellenlaufzeit läßt sich aus dem EKG und dem am Finger gemessenen Photoplethysmogramm, das ohnehin für die Bestimmung der Sauerstoffsättigung benötigt wird, ermitteln (s. Abbildung 7). Eine gesonderte Sensorik ist nicht erforderlich.

Unsere Meßmethode zeigt, daß sich der systolische Blutdruck in den kurzen Ruhepausen nach einer Belastung signifikant ändert. Dadurch sind neuartige Einblicke in die Herz-Kreislaufdynamik des Patienten möglich. Das Verfahren wird zur Zeit von Matthias Erig in Zusammenarbeit mit Prof. Heinz Liesen und Prof. Michael Weiß, Sportwissenschaftliches Institut der Universität Paderborn, Forschungsforum Gesundheit – Technik – Kommunikation, und mit Prof. Eckardt Trowitzsch, Schlaflabor der Vestischen Kinderklinik, weiterentwickelt.

#### Ausblick

Die Polysomnographie im Schlaflabor bildet die Grundlage für die Diagnose von Krankheiten des Herz-Kreislaufsystems. Herzrhythmusstörungen, Ein- und Durchschlafprobleme, obstruktive Schlafapnoen und starkes Schnarchen können erkannt werden. Bei Säuglingen und Kleinkindern untersucht man kardiorespiratorische Störungen und rät Eltern bei SIDS-gefährdeten Patienten zu einem Heimmonitoring.

Aufgabe moderner Polysomnographen ist es, Mediziner von Routinearbeiten zu entlasten. Ein System muß die verschiedenen Atemmuster automatisch erkennen, Sauerstoffabfälle feststellen und Schlafstadien registrieren. Es muß außerdem robust in der Handhabung und leicht zu bedienen sein. Manuelle Nachbesserungen der automatischen Analyse müssen unterstützt werden.

Unsere interdisziplinären Arbeiten haben das Ziel, die Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse zu verbessern und die Arbeitsbedingungen des Personals im Schlaflabor durch die intelligente, automatische Auswertung der polysomnographischen Registrierungen zu erleichtern. Außerdem wird durch die Rechner-Vorauswertung Zeit eingespart. Darüber hinaus untersuchen wir, wie durch eine vereinfachte Sensorik Streß und Belastung für die Patienten im Schlaflabor gemindert werden können. Es geht

darum, die Aussagekraft der Polysomnographie bei gleicher Sensoranzahl zu steigern. Besser noch wäre es, durch eine geringere Anzahl von Sensoren, die simultan mehrere Informationen messen, die gleiche diagnostische Aussage zu erreichen. Kombinationssensoren können Puls, Herzfrequenzvariabilität, Sauerstoffsättigung und Atemmuster erfassen. Atemaktivität, Schnarchen, Puls und Muskeltonus lassen sich ebenfalls mit nur einem Sensor ermitteln. Eine vereinfachte und den Patienten weniger belastende Sensorik würde vor allem das Baby-Heimmonitoring erleichtern.

#### Literatur

- [1] Greger, R., Windhorst, U.: Comprehensive Human Physiology. Vol. 1&2, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1996.
- [2] Barschdorff, D.: Neuronale Netze in der SIDS-Forschung, in Trowitzsch, E. et al. (Hrsg.): Prävention des SIDS, Acron Verlag, Berlin, 1992, S. 173-180.
- [3] Trowitzsch, E., Buschatz, B., Schlüter, B., Barschdorff, D., Hanheide, I.: Automatic Polysomnographic Apnea Analysis in Childhood. Z. Somnologie, 1997, 1, 132-137.
- [4] Barschdorff, D., Erig, M.: Kontinuierliche Blutdruckbestimmung während des Belastungs-EKG. Z. Biomedizinische Technik, 1998, 43, H. 3, 34-39.
- [5] Jäger, A.: Untersuchung der Sensorik zur Analyse von Atemregulationsstörungen bei Säuglingen. Diss. Universität Paderborn 1997.
- [6] Gerhardt, D.: Verfahren zur Schlafstadienerkennung bei Säuglingen und Kleinkindern. Diss. Universität Paderborn 1998.
- [7] Zhang, W.: Respiratory Pattern Detection using Photoplethysmographic Signals. Diss. Uni Paderborn 1998.

# „Global Change“ in Afrika

## *Sedimentanalysen und Kohlenstoffisotope entschlüsseln die Umweltgeschichte tropischer Ökosysteme*

Fast täglich wird in den Medien die Frage aufgeworfen, ob unser heutiges Klima noch „normal“ sei. Sich häufende Wetterkapriolen und singuläre bis periodische Witterungsergebnisse wie El Niño und widersprüchliche Szenarien aus Klimamodellen verursachen ein öffentliches Stimmungsbild, das zwischen zukunftsgerbenem Fatalismus und allgemeiner Weltuntergangsstimmung („Titanic-Effekt“) schwankt.

Theoretisch abgeleitete Klimamodelle können durch empirisch gewonnene Daten über vorzeitliche Umweltveränderungen verbessert werden. Seit mehreren Jahren untersucht das DFG-Projekt „Paläoklima Afrika“ Ökosystemveränderungen, die durch natürliche Klimaschwankungen während und nach den globalen Vereisungen vor 20 000 Jahren, vor allem in Zentralafrika, ausgelöst wurden.

### **Natürlicher Treibhauseffekt und Klimawandel**

Eisbohrkerne mit eingeschlossenen Gasbläschen aus dem antarktischen Gletscherschild zeigen, daß die Zusammensetzung der eiszeitlichen und der nacheiszeitlichen Erdatmosphäre schwerwiegenden Veränderungen unterlag. Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit um 18 000 yr. B.P. (years Before Present, <sup>14</sup>C Radiocarbon-Jahre vor 1950) lag der Gehalt an Kohlendioxid noch unter 200 ppmv. Gegenüber den heutigen Werten von knapp 370 ppmv CO<sub>2</sub> bedeutet dies fast eine Verdoppelung der Kohlendioxidkonzentration. Die jüngste CO<sub>2</sub>-Zunahme, gemessen auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii von 1958 bis 1993, dokumentiert einen vermutlich anthropogen mit verursachten und an Geschwindigkeit weiter zunehmenden Anstieg von 40 ppmv CO<sub>2</sub> in nur 35 Jahren (Abbildung 2). Durch Absorption langwelliger infraroter Sonnenstrahlung an den CO<sub>2</sub>-Molekülen stieg nach dem Ende des „Letzten Glazialen Maximums (LGM)“ die Temperatur, bezogen auf heute, um über 7,5 °C an. Dieser weltweit wirksame natürliche Treibhauseffekt führte bei einer stetig wachsenden CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zum Abschmelzen der Gletscher und initiierte großräumige Vegetationsveränderungen auf der Erde.

### **Wie alt ist der Regenwald?**

Bis in die 60er Jahre war die Auffassung verbreitet, daß der äquatoriale Regenwald Afrikas eines der stabilsten Ökosysteme der Erde sei. Große biologische Diversität bei Pflanzen und Tieren und die hohe Biomasseproduktion der tropischen Gebiete legten den Schluß nahe, daß sich diese Lebensformen über geologische Zeiträume hinweg unter gleichbleibenden Umweltbedingungen



**Dr. rer. nat. Jürgen Runge, Diplom-Geograph,** ist Wissenschaftlicher Angestellter im Fachbereich 1/Physische Geographie. Arbeitsgebiete sind Geomorphologie, Geoökologie, Satelliten-Fernerkundung und Bildanalyse; regionaler Forschungsschwerpunkt ist Afrika südlich der Sahara.

entwickelt und bis in die Gegenwart überdauert haben mußten. Die drastischen Klimaeinschnitte der Eiszeiten galten als Phänomen der Außertropen und spielten für die Umwelt- und Klimaverhältnisse der immerfeuchten Äquatorialgebiete scheinbar nur eine untergeordnete Rolle. Vermutet wurden aufgrund von ausgetrockneten Seenbecken in der Wüste glazialzeitlich höhere Niederschläge (Pluvialzeiten) und eine lokale Einengung der feuchttropischen Wälder.

In den vergangenen 25 Jahren konnte durch zahlreiche Altersbestimmungen mit der <sup>14</sup>C Radiocarbon-Methode an organischen Ablagerungen und anhand pollenanalytischer Untersuchungen gezeigt werden, daß offensichtlich auch der tropische Regenwald während der Eiszeit von ausgeprägten Klimazäsuren und somit von Vegetationsveränderungen betroffen war. Zeitschnitte dieser früheren klimagesteuerten Vegetationsverteilung in Afrika zeigt zusammengestellt nach verschiedenen Quellen Abbildung 3. Es wird deutlich, daß zum Zeitpunkt des LGM der zentralafrikanische Regenwald bis auf ein kleines Refugialgebiet um den Kongo-Flußbogen herum und bis auf einige inselartige Waldgebiete an der westafrikanischen Küste durch Baum- und Grassavannen verdrängt war. Erst in der Nacheiszeit, von 11 000 bis 10 000 Jahren (Jüngere Dryas-Zeit, Abbildung 3) begann sich der tropische Wald unter zunehmender Erwärmung und ansteigenden Niederschlägen erneut schnell in Zentralafrika auszubreiten.

### **„Schwere“ Gräser – „leichte“ Bäume**

Ein wichtiger Zusammenhang zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft, der Temperatur und der Pflanzenverbreitung besteht bei der CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Bindung durch die Zellen von sogenannten C<sub>3</sub>- und C<sub>4</sub>-Pflanzen bei der Photosynthese. Die C<sub>3</sub>-Pflanzen, hierzu gehören zahlreiche Bäume, bauen das Kohlen-





Abb. 1: Feldarbeiten mit Bohrungen in Flußablagerungen der Zentralafrikanischen Republik (Aufnahme: J. Runge, November 1996).

dioxid initial über den *Calvin-Benson-Zyklus* in die Zelle ein.  $C_4$ -Pflanzen, viele Gräser der tropischen Savannen (z.B. panicoide, andropogonoide Gräser und Cyperaceen) gehören hierzu, unterscheiden sich insofern, daß als erstes Fixierungsprodukt aus der Kohlendioxidaufnahme ein Körper mit 4 und nicht mit 3 Kohlenstoffatomen gebildet wird (*Hatch-Slack-Kortschak-Weg*).  $C_3$ - und  $C_4$ -Pflanzen kommt bei der Rekonstruktion früherer Vegetationsmuster eine große Bedeutung zu, da diese Pflanzengruppen die natürlich in der Atmosphäre vorkommenden Kohlenstoffisotope  $^{12}C$  und  $^{13}C$  bei der Aufnahme von  $CO_2$  „ungleich“ behandeln. Nach Isotopen besteht das  $CO_2$  der Atmosphäre aus 98,89%  $^{12}C$  und 1,11%  $^{13}C$ . Das in geringerer Menge vorhandene  $^{13}CO_2$  wird bei der Aufnahme zur Photosynthese gegenüber  $^{12}CO_2$  von  $C_3$ -Pflanzen diskriminiert. Die verschiedenartige Form der  $CO_2$ -Fixierung von  $C_3$ - und  $C_4$ -Pflanzen führt in der Stoffbilanz zu einem relativ höheren Anteil von  $^{13}C$  in  $C_4$ -Pflanzen. Gräser und der durch Gräser gebildete organische Kohlenstoff im Humus des Bodens ist deshalb der Masse nach geringfügig „schwerer“ als der Kohlenstoff, der durch  $C_3$ -Pflanzen aufgebaut wurde. Typische  $\delta^{13}C$ -Werte für  $C_3$ -Pflanzen („Bäume“) liegen zwischen -20,0 bis -40,0‰.  $C_4$ -Pflanzen („Gräser“) produzieren eine „schwerere“ organische Substanz mit  $\delta^{13}C$ -Werten von -10,0 bis -15,0‰. Die Bestimmung des  $^{13}C/^{12}C$ -Kennwertes erfolgt massenspektrometrisch und wird als  $\delta^{13}C$ -Wert (negativer Wert in ‰) angegeben (vgl. Mariotti 1991, Schwartz 1991).

Für die Rekonstruktion der früheren Vegetationsverhältnisse in Afrika lassen sich nun fossile Humushorizonte und Kohlenstoffspuren im Sediment durch den  $\delta^{13}C$ -Wert der initialen photosynthetischen

Bindung durch  $C_3$ -Pflanzen oder durch  $C_4$ -Pflanzen zuordnen. Bei gleichzeitiger Altersdatierung mit Hilfe des dritten, nicht-stabilen Kohlenstoffisotops  $^{14}C$  sind bei der Auswertung von Bohrprofilen im Grenzbereich von Regenwald und Savanne klimagesteuerte Verschiebungen der Vegetationseinheiten erkennbar (Abbildungen 2 und 4).

### „Düngung“ der Wälder durch $CO_2$ , gegenwärtige Trends

Bemerkenswert erscheinen zwei Limits der Kohlendioxidkonzentration seit dem LGM, die vermutlich die Vegetationsverteilung in Afrika entscheidend determiniert haben. Bei der LGM-zeitlichen  $CO_2$ -Konzentration von weniger als 200 ppmv zeigten die Regenwaldbäume ( $C_3$ ) eine photosynthetische Streßreaktion und drosselten den Stoffwechsel zugunsten der vitaleren Gräser, die als  $C_4$ -Pflanzen auch unterhalb von 200 ppmv assimiliert haben. In jüngerer Zeit, seit etwa dem Jahr 1970, werden mit Überschreiten der  $CO_2$ -Konzentration von ca. 330 ppmv die  $C_3$ -Bäume hinsichtlich der Produktivität ihrer Assimilate gegenüber den  $C_4$ -Pflanzen, die nun einen „Sättigungsgrad“ der Netto-Photosynthese erreicht haben, begünstigt (Polly et al. 1993, Robinson 1994). Dem Treibhauseffekt der jüngeren Vergangenheit ist jetzt ein  $CO_2$ -Düngeeffekt zuzuschreiben, der eine natürliche Wiederausbreitung der Regenwälder im Übergangsbereich zu den Savannen fördert. Luft- und Satellitenbildvergleiche während der letzten 40 Jahre haben diesen Trend in nicht besiedelten Regionen als quasi-natürliche Waldsukzession empirisch belegen können (vgl. Runge & Neumer, im Druck).

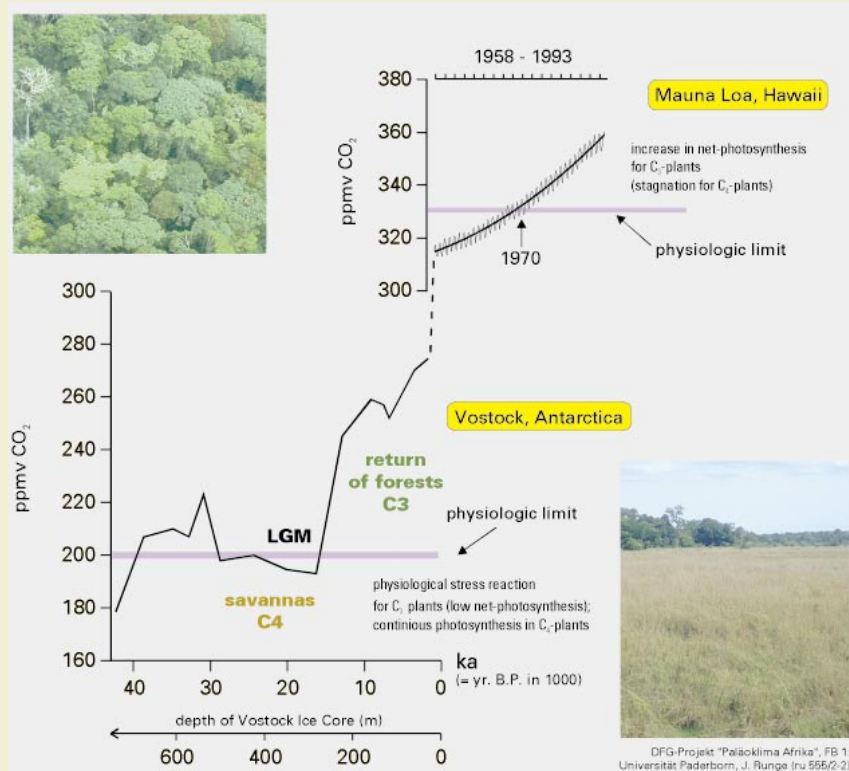


Abb. 2: Kohlendioxidkonzentrationen in der Erdatmosphäre nach Eisbohrkernen und nach aktuellen Messungen seit der letzten Eiszeit.

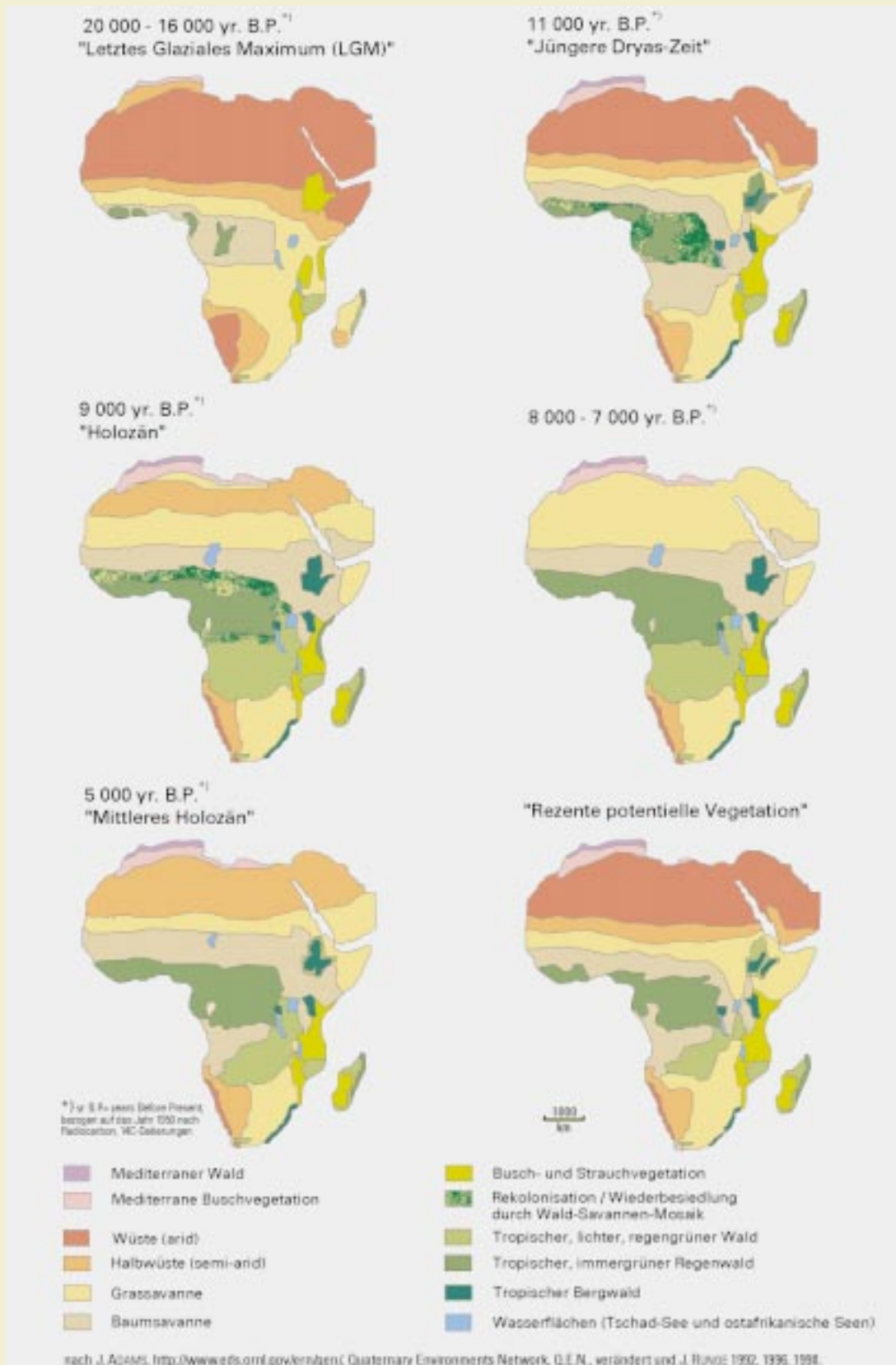


Abb. 3: Vegetationsentwicklung in Afrika seit der Eiszeit.

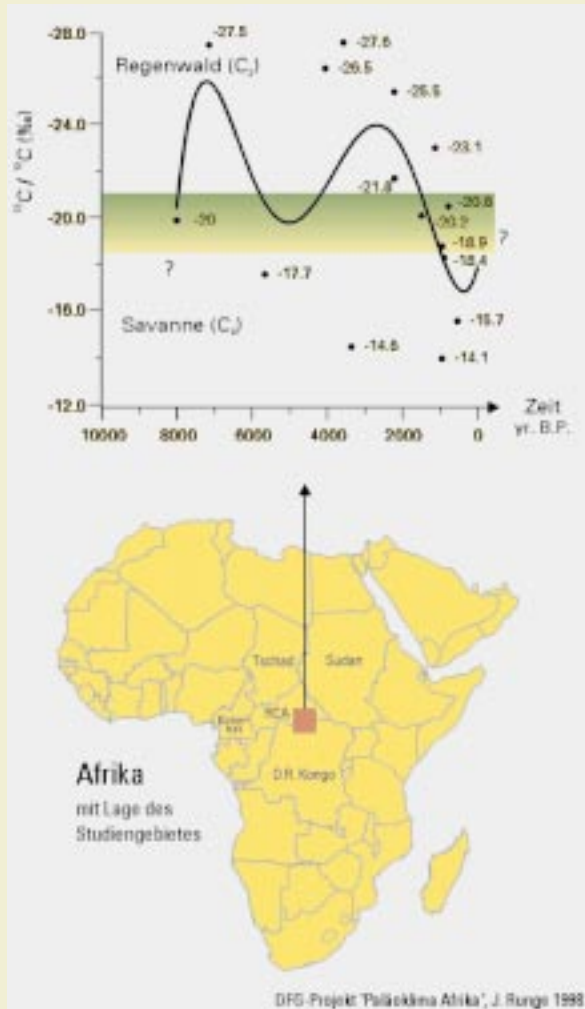


Abb. 4: Das  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnis und  $^{14}\text{C}$ -Datierungen belegen Umweltveränderungen am Regenwald-/Savannengrenze während der letzten 10 000 Jahre.

### Fallstudie

#### Mbomou-Plateau, Zentralafrika

Da das Mbomou-Plateau im Südosten der Zentralafrikanischen Republik seit dem Paläozoikum terrestrisches Abtragungsgelände war, kamen als natürliche „Archive“ der quartären Klima- und Landschaftsgeschichte ausschließlich kohlenstoffhaltige Sedimente in Flußtälern in Frage. Bohrungen von 2 bis 4 Meter Tiefe in den zur Zeit grasbewachsenen Auen und Altarmen des Mbari-Tales durchteuften fast das gesamte Holozän, d.h. die letzten 10 000 Jahre (vgl. Abbildungen 1 und 3). Rückschlüsse über klima- und vegetationsgesteuerte Akkumulations- und Erosionsphasen der jüngeren Landschaftsgeschichte in Zentralafrika ergaben sich durch die Bestimmung der stabilen Kohlenstoffisotope  $^{13}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$  und durch die absolute Datierung mit Hilfe des radioaktiven Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  (Abbildung 4).

Die Gegenüberstellung der  $^{14}\text{C}$ -datierten Proben mit den korrespondierenden  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten zeigt ein Verteilungsmuster, das klimageschichtlich bedingte Wechsel von Wald zu Savanne markiert (Abbildung 4). Die polynomische Verteilungskurve

faßt im ersten Abschnitt die im Mbari-Tal aufgetretene Verschiebung der Vegetationszusammensetzung von  $\text{C}_4$ -Savannen zu  $\text{C}_3$ -Wäldern zwischen heute und 2 500 bis 3 000 yr. B.P. zusammen. Der weitere Verlauf der Kurve zeigt ein Ansteigen der  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte auf  $-17,0\text{‰}$ , was als neuerliche Waldregression und als Ausbreitung von Savannen um 5 000 yr. B.P. interpretiert wird. Es folgt um 7 000 bis 7 500 yr. B.P. ein erneut niedriges  $\delta^{13}\text{C}$ -Signal von  $-27,5\text{‰}$ , das eine Waldausdehnung anzeigt. Um 8 000 yr. B.P. markiert ein Wert um  $-20,0\text{‰}$  die wiederholte Savannenexpansion, die als Ausdruck trockenerer hygrischer Rahmenbedingungen zu werten ist (Abbildung 4).

Die Lage der Regenwald-Savannengrenze am Nordrand des Kongo-Beckens scheint im Holozän vor allem durch einen klimatisch induzierten, semi-humiden bis leicht semi-ariden hygrischen Wandel von jeweils 2 000 bis 3 000 Jahren Dauer gesteuert worden zu sein. Der menschliche Einfluß auf die Regenwälder und Savannen durch Buschfeuer, Viehzucht und Landwirtschaft wird erst in der Jungsteinzeit (Neolithikum, 4 000 bis 1 800 v. Chr.) deutlicher. Dieser anthropogene Faktor korrespondiert mit dem letzten Drittel der Kohlenstoff-Isotopenkurve in Abbildung 4, der den heutigen Verhältnissen entsprechend als Ausdruck einer offenen, stark feuerbeeinflussten Savannenlandschaft zu werten ist.

### Literatur

- Mariotti, A. (1991): Le carbone 13 en abondance naturelle, tracer de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnement continentaux. - Cah. ORSTOM, sér. Pédologique, 26, 4: 299-313, Paris.
- Polley, H.W., Johnson, H.B., Mariono, B.D. & H.S. Mayeux (1993): Increase in  $\text{C}_3$  plant water-use efficiency and biomass over glacial to present  $\text{CO}_2$  concentrations. Nature, 361: 61-64, London.
- Robinson, J.M. (1994): Atmospheric  $\text{CO}_2$  and plants. Nature, 368: 105-106, London.
- Runge, J. (1992): Geomorphological observations concerning palaeoenvironmental conditions in eastern Zaire. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 91:109-122, Berlin, Stuttgart.
- Runge, J. (1996): Bericht des DFG-Projektes Paläoklima Afrika über zwei Geländekampagnen in der Zentralafrikanischen Republik 1995-1996. Paderborner Geogr. Studien, Materialien und Manuskripte, 1-63, Paderborn.
- Runge, J. (1998): Rezent und holozäne Vegetations- und Klimadynamik an der Regenwald-/Savannengrenze in Nord-Kongo (Zaire) und der Zentralafrikanischen Republik ( $4^\circ\text{-}5^\circ 20'\text{N}$ ,  $23^\circ\text{-}25^\circ\text{E}$ ). Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil 1/2: 91-113, Berlin-Stuttgart.
- Runge, J. & M. Neumer (im Druck): Landscape dynamics of the rain forest/savanna border from 1955 to 1990 evidenced by aerial photographs and LANDSAT-TM data in northern Zaire. ORSTOM, Colloques et séminaires, Paris.
- Schwartz, D. (1991): Intérêt de la mesure de  $\delta^{13}\text{C}$  des sols en milieu équatorial pour la connaissance des aspects pédologiques et écologiques des relations savane-forêt. Cah. ORSTOM, sér. Pédologique, 26, 4: 327-341, Paris.



# Clever die Sonne nutzen

## *Einstrahlungsmessungen mit dem Solar-Igel*

Hausbewohner und Büroangestellte kennen das Ärgernis: Werden bei Sonnenschein nicht ganz schnell die Jalousien heruntergelassen, heizt sich der Raum unerträglich auf. Schieben sich Wolken vor die Sonne, ist es plötzlich ziemlich dunkel im Zimmer, sofern die Lamellen nicht schräg gestellt oder die Jalousien wieder hochgezogen werden.

Dieses Beispiel macht deutlich, wie wichtig die genaue Kenntnis der aktuellen solaren Einstrahlung für technische Anwendungen sein kann. So weisen z.B. Photovoltaik-Anlagen gegenüber konventionellen Kraftwerken (Gas-, Kohle- und Atomkraftwerke) die Eigenschaft auf, daß ihre Leistungsabgabe vom aktuellen Einstrahlungsangebot abhängig ist. Aus diesem Grund können sie innerhalb einer betrieblichen Einsatzplanung kaum disponiert werden. Eine in diesem Zusammenhang stehende Fragestellung wird seit 1990 von der Arbeitsgruppe Regenerative Energiequellen im Fachgebiet Elektrische Energieversorgung bearbeitet. Dabei wird untersucht, was in einem elektrischen Energieversorgungsnetz passiert, wenn eine Vielzahl von Photovoltaik-Anlagen einen nennenswerten Anteil der elektrischen Energie bereitstellt. Eine Kernfrage der Untersuchung war daher die Modellierung der flächendeckenden Einstrahlungsverteilung. Damit können die Leistungsbeiträge auch von weiträumig verteilten Photovoltaik-Anlagen nachgebildet und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf das elektrische Energieversorgungsnetz analysiert werden. Es stellte sich aber sehr schnell heraus, daß derarti-

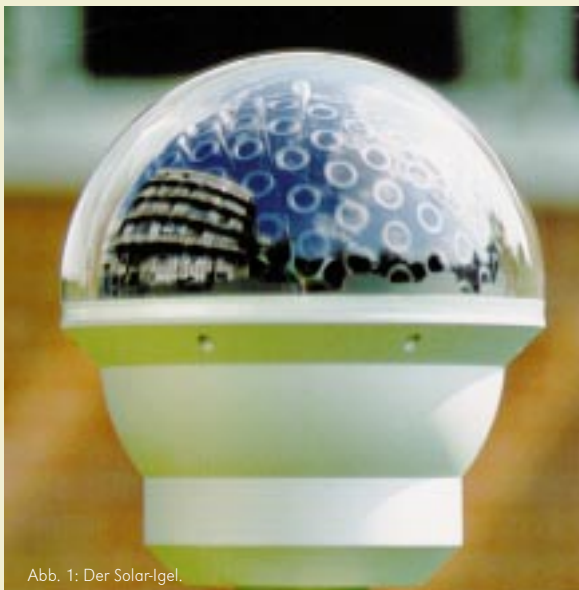


Abb. 1: Der Solar-Igel.



**Dr.-Ing. Egon Ortjohann** ist Akademischer Oberrat im Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Fachbereich 14/Elektrotechnik, und ist zuständig für den Bereich „Nutzung regenerativer Energiequellen“ in elektrischen Energieversorgungssystemen.



**Dipl.-Ing. Michael Gruffke** ist seit 1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Fachbereich 14/Elektrotechnik, und beschäftigt sich mit Projekten rund um die solare Einstrahlungsmessung.

ge Einstrahlungsdaten nicht zur Verfügung standen. Das lag im wesentlichen an der mangelnden Verfügbarkeit von kostengünstigen und wartungsarmen Solarstrahlungs-Meßgeräten.

### Der Solar-Igel

Diese Schwierigkeiten führten zur Entwicklung eines neuartigen Sensors, des Solar-Igels. Die Ergebnisse mit den ersten Prototypen waren derart vielversprechend, daß eine Weiterentwicklung mit Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Solar Nordrhein-Westfalen in Angriff genommen wurde, deren aktueller Stand in Abbildung 1 zu sehen ist.

Der Sensor Solar-Igel arbeitet auf der Basis partiell erfaßter Himmelsbereiche (Abbildung 2). Die Bereichsabgrenzung wird durch 135 Tubusoptiken erreicht. Die Innenoberflächen der Tubusoptiken sind derart gestaltet, daß Reflexionen unterdrückt werden. Auf diese Weise wird eine scharfe Abgrenzung der einzelnen Himmelsbereiche gewährleistet. Die 135 Tubusoptiken sind radial auf einer Halbkugeloberfläche positioniert, wobei durch die Anordnung eine gleichmäßige Erfassung des Himmelsraums erreicht wird. Die Umwandlung der Einstrahlung in ein Meßsignal wird jeweils mit einer Silizium-Photodiode vorgenommen. Mit einem im Sensor integrierten Mikrorechner werden Meßablauf und Datenerfassung gesteuert.

Bei den Einstrahlungsmessungen ist vor allem der korrekte Zeitbezug von Bedeutung. Damit dies gewährleistet ist, wird die Messung mit einem DCF77-Zeitsignalempfänger auf die Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt synchronisiert. Hierdurch lassen sich die Messungen von Solar-Igeln an verschiedenen Standorten zeitlich aufeinander abstimmen.

Bedingt durch das Meßprinzip ergibt sich für den Solar-Igel eine

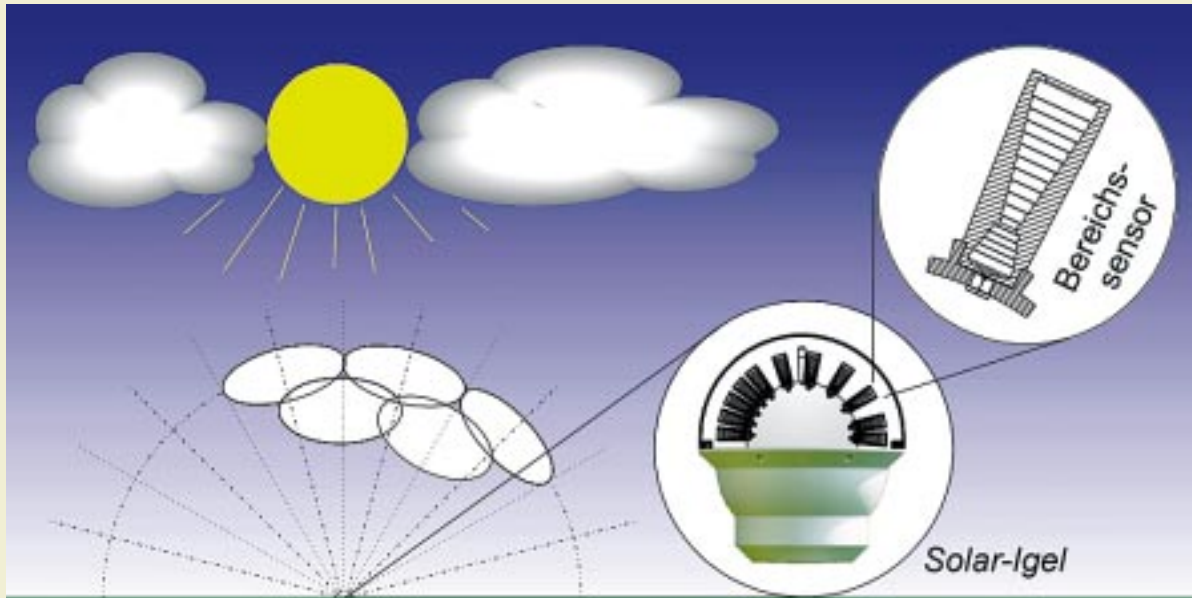


Abb. 2: Funktionsprinzip des Solar-Igels.

Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Diese liegen zum einen in der Ergänzung der konventionellen Strahlungsmesstechnik. So können z.B. mit diesem Meßsystem die meteorologischen Standardgrößen Global-, Diffus- und Direktstrahlung gemeinsam erfaßt werden. Bisher werden dafür jeweils spezielle Meßgeräte eingesetzt. Aber auch zusätzliche Größen wie Wolkenzugrichtung, Wolkenhöhe und Wolkengeschwindigkeit lassen sich mit dem Solar-Igel vergleichsweise einfach bestimmen.

### Neue Anwendungen für den Solar-Igel

Mit dem neuen Meßsystem eröffnen sich aber auch vielfältige neue Anwendungsgebiete, die in dieser Form mit konventioneller Meßtechnik gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich sind. Eines der neuen Einsatzgebiete ist die Gebäudeautomation. Die moderne Gebäudearchitektur ist vielfach durch großflächige Glasfassaden geprägt. Dem Vorteil der großzügigen Tageslichtnutzung steht jedoch der Nachteil einer notwendigen Raumklimatisierung entgegen. Die Steuerung des Wärmeeintrags wird in der Regel durch Beschattungssysteme (Außenjalousien) vorgenommen. Um einen möglichst großen Komfort für den Nutzer zu erreichen, werden zunehmend moderne Gebäudeleitsysteme eingesetzt. Für diesen Zweck wird vielfach der Europäische Installationsbus (EIB) eingesetzt. Dieses Bussystem gestattet eine individuelle Raumbeleuchtung und Klimatisierung durch zentrale Steuerung bei dezentralen Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer vor Ort.

Durch solche Bussysteme lassen sich hohe Energieeinsparpotentiale erschließen. Die natürliche Ausleuchtung, aber auch der Wärmeeintrag in einem Raum sind sehr stark vom Sonnenstand und von der Bewölkung abhängig. Daher ist die Kenntnis, aus welcher Richtung und mit welcher Intensität die Strahlung in den Raum eintritt, eine Schlüsselinformation für eine komfortable und energieeffiziente Abschattungssteuerung. Mit der bisher eingesetzten Strahlungssensorik ist eine Abschattungssteuerung, die die Geometrie des Gebäudes mit einbezieht, sehr aufwendig und kostenintensiv. Hier greifen die Vorteile des Solar-Igels, der

die Einstrahlung richtungsaufgelöst bereitstellen kann. Somit ist die Einstrahlungsverteilung auf der gesamten Gebäudehülle bekannt und damit auch der Strahlungseintrag durch die Fenster berechenbar.

Die erste Systemintegration dieses neuen Steuerungskonzepts für Abschattungssysteme mit dem Europäischen Installationsbus wird derzeit bei der Landesversicherungsanstalt Westfalen (LVA) in Münster vorgenommen. Es handelt sich um ein Bürogebäude mit einer ringförmigen geometrischen Struktur. Neben einem vorhandenen Altgebäude wird ein Neubau mit über 200 Büroeinheiten (1 000 Jalousien) errichtet. Es handelt sich um einen Rundbau mit offenem Innenhof (Abbildung 3).

In Verbindung mit dem alten Bürogebäude kommt es je nach Sonnenstand zu Teilabschattungen. Ziel der entwickelten Abschattungssteuerung ist es, möglichst viel diffuses Sonnenlicht zur Beleuchtung der Räume zu nutzen – aber gleichzeitig die Blendung und Aufheizung durch direkte Sonneneinstrahlung zu verhindern. Das hierzu entwickelte Steuerungskonzept befindet sich derzeit in einer ersten Erprobungsphase im Gebäude der LVA.

Neben dieser zentralen Abschattungssteuerung in einem großen Verwaltungsgebäude ist ein Überwachungssystem in der Umsetzung, das in einem Museum zur Vermeidung unzulässig hoher Solarstrahlungsbelastungen der historischen Kunstwerke – bei möglichst natürlicher Ausleuchtung – beitragen soll.

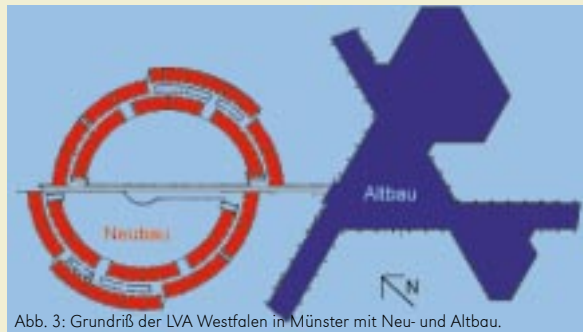


Abb. 3: Grundriß der LVA Westfalen in Münster mit Neu- und Altbau.



Abb. 4: Standorte von acht Sensoren im Stadtgebiet Paderborn.

**Meßnetz im Paderborner Stadtgebiet**

Für viele Bereiche der Meteorologie oder Klimatologie werden flächendeckende Strahlungsdaten immer wichtiger. Ein Anwendungsfall in Ballungsräumen könnte z.B. die Ozonprognose sein, bei der die Einstrahlung einen wesentlichen Einflußfaktor darstellt. Aber auch in Energieversorgungssystemen wird die Kenntnis der aktuellen Einstrahlungssituation immer wichtiger. So macht der Beleuchtungsanteil in dem Lastgang eines Energieversorgungsunternehmens einen nennenswerten Anteil aus. Daher sind besonders Prognoseinstrumente gesucht, die es ermöglichen, einstrahlungsabhängige Lasten (Beleuchtung) und Einspeisungen (Photovoltaik-Anlagen) in ihrem Verhalten besser vorhersagen zu können. Ausgehend von diesen Fragestellungen wird derzeit ein Meßnetz zur flächendeckenden Erfassung der Solarstrahlung aufgebaut. Dieses Meßnetz im Stadtgebiet von Paderborn deckt eine Fläche von ca. 150 Quadratkilometern ab. Die Sensoren sind auf verschiedenen öffentlichen Gebäuden installiert (Abbildung 4).

Mit diesem Meßnetz wird die Einstrahlung mit einer halben Sekunde zeitlicher Auflösung erfaßt. Der Datentransfer zwischen

der Hochschule und den Meßpunkten wird über ein speziell entwickeltes ISDN-Rechnernetzwerk abgewickelt (Abbildung 5). Eine einzelne Station besteht jeweils aus einem Solar-Igel, einer Schnittstelleneinheit inklusive Funkuhr und einem Personalcomputer (PC), der den gesamten Meßbetrieb steuert und die vom Sensor gelieferten Meßdaten aufzeichnet (Daten-Logger). Die innerhalb der halbsekündlichen Meßzyklen ermittelten Einstrahlungsdaten werden in Form eines Datentelegramms seriell über die Schnittstelleneinheit an den Daten-Logger übertragen. Von diesem können die Meßdaten zur Verarbeitung und für Dokumentationszwecke weiterverwendet werden. Die Auswertung kann sowohl zeitsynchron zur Messung (online) als auch zeitversetzt auf der Basis von archivierten Meßdaten (offline) erfolgen. Zu diesem Zweck kann sich ein Anwender entweder über das Netz der Hochschule, über das Internet oder direkt über eine ISDN-Leitung mit dem Zentralrechner (Collector) verbinden. Anschließend können sowohl die aktuellen Einstrahlungsdaten an den Meßstandorten (für diesen Zweck baut der Collector eine ISDN-Verbindung zu den ausgewählten Standorten auf) als auch aufgezeichnete Daten vom Collector zur Verfügung gestellt werden.

Die auf diese Weise gewonnenen Einstrahlungsdaten könnten sich ebenfalls im oben genannten Bereich der Gebäudeautomation nutzen lassen. Dabei ist es für die Steuerung nicht notwendig, einzelne Gebäude mit Sensoren zu bestücken, sondern es genügen die per Datenleitung aus dem Meßnetz übermittelten Informationen.

Ein weiteres Ziel ist es, neben der Bestimmung der aktuellen Einstrahlungssituation eine Einstrahlungsprognose für beliebige Punkte innerhalb des Netzes vorzunehmen. Die zeitliche bzw. räumliche Voraussage (Prognosehorizont) für einen beliebigen Standort soll dabei 5 bis 15 Minuten im voraus bzw. 5 bis 20 Kilometer gegen die Wolkenzugrichtung erfolgen. Zur Zeit sind solche Aussagen weder mit der aktuellen terrestrischen Meßtechnik noch mit der Erdbeobachtung durch Satelliten möglich.

Die Idee einer solaren Einstrahlungsprognose geht auf die Überlegung zurück, daß die aktuellen Strahlungsverhältnisse, auf den Erdboden bezogen, im Laufe der Zeit einer gerichteten Bewegung unterliegen. Für den Prognosehorizont kann die Wirkung der Wolken, abgesehen von der gerichteten Bewegung, als annähernd konstant angenommen werden. Voraussetzungen für eine Prognose sind deshalb Informationen über die Wolkenzugrichtung, die Wolkengeschwindigkeit und die Strahldichtevertelung der aktuellen Einstrahlungssituation.

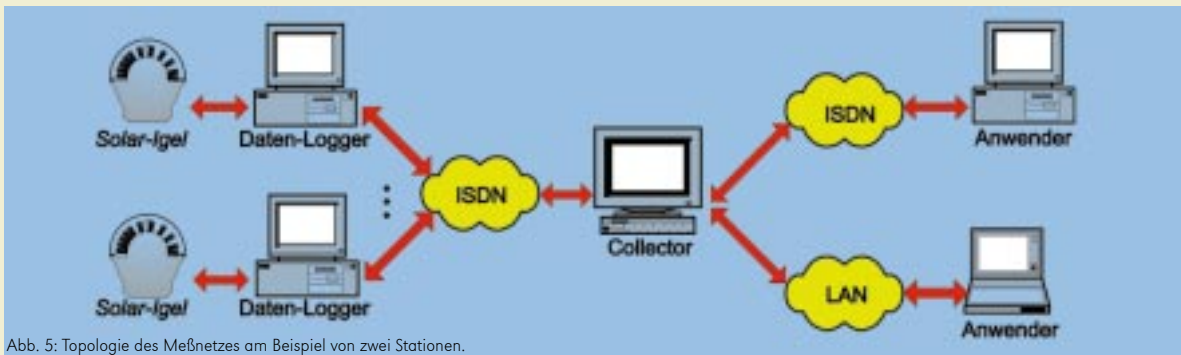


Abb. 5: Topologie des Meßnetzes am Beispiel von zwei Stationen.



# Dreidimensionale Welten auf flachen Bildschirmen

*Ein Preis-Leistungs-Vergleich von Darstellungstechniken*

Virtuelle Städte, historische Gebäude, komplexe Moleküle, ein Flug durch das Weltall – dies alles kann dreidimensional auf Bildschirmen der neueren Generation erlebt werden. Aber stimmt „dreidimensional“? Die meisten vermeintlich dreidimensionalen Abbildungen am Computer sind einfache perspektivische Projektionen der dreidimensionalen Modelle auf flache (zweidimensionale) Bildschirme. Man nennt diese Darstellungen auch zweieinhalbdimensional ( $2\frac{1}{2}d$ ).

Können Sie in Abbildung 1 genaue räumliche Strukturen erkennen? Dies ist eine perspektivische Darstellung der dreidimensionalen Struktur eines Moleküles – dargestellt als Stäbchenmodell. Das Stäbchenmodell eignet sich besonders gut für den Vergleich von Bindungsabständen und Bindungswinkeln zwischen Atomen oder Atomgruppen. Dabei ist es jedoch besonders schwer, einen räumlichen Eindruck von dem Molekül zu erhalten.

Die Bewegung um ein solch flaches Objekt spiegelt eine greifbare, dreidimensionale Gestalt wider, die sich kurz hinter oder vor der Mattscheibe bewegt. Stereo-Darstellungen mit Hilfe von Datenhelm, Stereobrillen und dem CAVE (1) sind dagegen echte Möglichkeiten, dreidimensional zu sehen. Stereodarstellungen

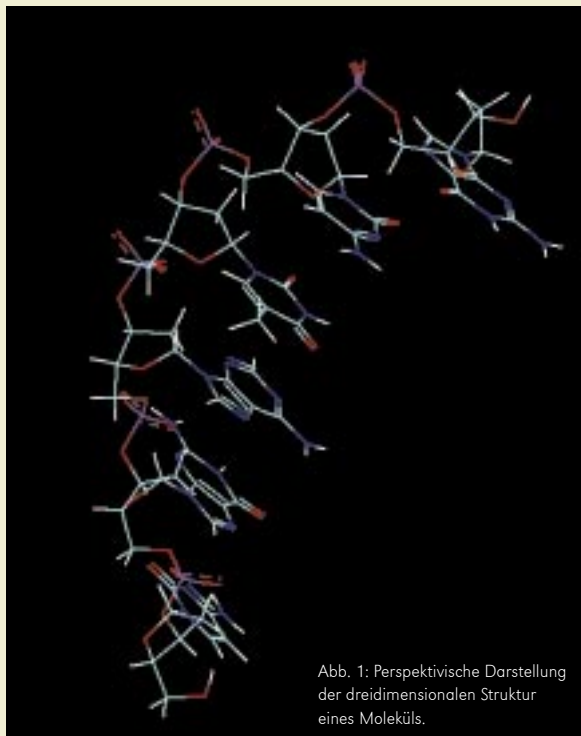


Abb. 1: Perspektivische Darstellung der dreidimensionalen Struktur eines Moleküls.



**Prof. Dr. Gitta Domik** (rechts) ist seit 1993 Professorin für praktische Informatik und leitet die Arbeitsgruppe „Computergraphik, Visualisierung und Bildverarbeitung“ im Fachbereich 17/Mathematik, Informatik.

**Diplominformatikerin Sabine Volbrach** führte die vergleichende Studie von Darstellungstechniken im Rahmen ihrer Diplomarbeit durch. Damit bekam sie 1997 den Preis für die beste Diplomarbeit des Fachgebietes Informatik zugesprochen. **Prof. Dr. Gregor Fels** ist seit 1993 Professor im Fachgebiet Organische Chemie im Fachbereich 13/Chemie und Chemietechnik (nicht auf dem Foto).

erzeugen durch das Übereinanderlegen zweier leicht verschiedener Ansichten einer dreidimensionalen Szene einen echten Raumeindruck. Dabei wird auf elektronischem oder mechanischem Wege jeweils dem linken und dem rechten Auge die entsprechende Ansicht zugeführt.

Abbildung 2 zeigt drei unterschiedliche Mechanismen, um Stereo-Darstellungen elektronisch zu erzeugen. Das CAVE im Electronic Visualization Lab, Chicago, kann von mehreren Personen gleichzeitig besucht werden und ist derzeit die am besten ausgestattete und teuerste Einrichtung zur Erzeugung künstlicher dreidimensionaler Welten. Ein Datenhelm wird im Paderborner Heinz Nixdorf MuseumsForum zur Ansicht der Virtuellen Modellfabrik verwendet. Anaglyphbrillen und entsprechende zweifarbige Bilder können ebenfalls einen räumlichen Eindruck vermitteln.

Für Chemiker, Biochemiker oder Pharmazeuten ist das Erkennen und Vergleichen räumlicher Strukturen im Molekül eine wichtige Aufgabe. Dafür ist ein guter dreidimensionaler Eindruck gefragt, der sowohl die Position der unterschiedlichen Atome im Molekül als auch die Bindungsabstände und Bindungswinkel brauchbar widerspiegelt.

Die Frage drängt sich auf, wieviel Geld ein Chemiker oder Pharmazeut für eine dreidimensionale Bildschirmausrüstung ausgeben muß, um brauchbar gute, dreidimensionale Moleküldarstellungen zu erzielen. Der Markt bietet elektronische Helme und Brillen in unterschiedlichsten Preisklassen. So kostete zur



CAVE



Datenhelm



Anaglyphbrille  
(Rot-Grün-Filter)

Abb. 2: Drei unterschiedliche Mechanismen, um Stereo-Darstellungen elektronisch zu erzeugen.

Zeit der durchgeführten Studie (1995/96) die Stereolösung mittels Datenhelm (Auflösung 640 x 480 Bildpunkte) etwa 30 000 Mark, mittels Polarisationsverfahren etwa 8 000 Mark oder mittels Shutter-Brillenverfahren 1 500 Mark, eine Rot-grün-Brille für das Anaglyph-Stereo dagegen etwa 4 Mark, während die einfache perspektivische Darstellung am Bildschirm mit null Mark angesetzt wurde, da zum Farbbildschirm keine Zusatzgeräte gebraucht werden.

Ein Preis-Leistungs-Verhältnis für dreidimensionale Darstellungsmodi ist jetzt gefragt. In Zusammenarbeit der Organischen Chemie (Prof. Dr. Gregor Fels) und der Informatik (Prof. Dr. Gitta Domik, Dipl.-Inform. Sabine Volbracht und Dipl.-Inform. Khatoun Shahrabaki) an der Universität Paderborn wurde solch ein Preis-Leistungs-Verhältnis erstellt. Dabei wurden nicht nur neue Erkenntnisse über die Qualität unterschiedlicher Darstellungsmodi gewonnen, sondern gleichzeitig die Grundlagen einer empirischen Studie aufgearbeitet, die über qualitative Merkmale wie „brauchbarer dreidimensionaler Eindruck“ entscheidet.

### Perspektive, Anaglyph- oder Shutter-Brillen?

Der Datenhelm bietet eine dreidimensionale Welt, in die der Benutzer eintaucht. Seine stark eingeschränkte Auflösung machte ihn für die Darstellung komplexer Moleküle unbrauchbar. Jeder im Datenhelm schon „untergetauchte“ Benutzer wird wissen, wie einfach und grobauflösend die derzeit dargestellten Welten unter dem Helm noch sind. Die Auflösung einer Workstation der Größe 1024 x 1200 wurde für die Arbeit mit Molekülen erwünscht, und somit wurden die drei Darstellungsmodi Perspektive, Anaglyph- und Shutter-Brillen-Stereo miteinander verglichen. Vom Polarisationsverfahren wurde bei höheren Kosten eine gleichwertige Lösung wie beim Shutter-Brillen-Verfahren erwartet und deshalb jenes, trotz seines Verbreitungsgrades, nicht in diese Studie einbezogen. Dabei sind die drei gewählten Darstellungsmodi (für Moleküle jeweils im Stäbchenmodell) so zu beschreiben:

- Perspektive: Die Moleküle werden durch eine Zentralprojektion (perspektivische Projektion) auf die Ebene des Bildschirms projiziert. Dabei werden den einzelnen Stäbchen die den Atomtypen entsprechenden Farben zugewiesen (z.B. Sauerstoff – rot; Stickstoff – blau, Wasserstoff – weiß).

- Anaglyph: Zwei perspektivische Ansichten der Moleküle werden generiert, eine Ansicht für das rechte Auge (in Grün)

und eine Ansicht für das linke Auge (in Rot). Der Betrachter trägt Brillen mit grün-roten Filtern, so daß jeweils ein Auge nur das dafür zuständige Bild sehen kann. Eine Einfärbung der einzelnen Stäbchen ist dabei nicht möglich, da die Farbe für das Stereoverfahren selbst benötigt wird.

- Shutter-Brillen-Stereo: Wieder werden zwei perspektivische Ansichten, eine rechte und eine linke, generiert. Diesmal können wieder Einfärbungen der Stäbchen wie in der Perspektive verwendet werden. Die rechte und linke Ansicht werden alternierend mit 120 Hz auf dem Bildschirm wiedergegeben: 60 Ansichten des Bildes für das linke Auge abgewechselt mit 60 Ansichten für das rechte Auge. Der Betrachter sieht den Bildschirm durch „StereoGraphics CrystalEyes® LCD Shutter-Brillen“, welche das jeweils richtige Bild dem entsprechenden Auge zuführen.

Die Frage, die sich nun stellte, lautet, ob nicht die Chemiker mittels der neuen und teuren Technologie der Shutter-Brillen genauer und schneller ihre Forschungsaufgaben am Bildschirm lösen können.

Die repräsentativen Forschungsaufgaben am Bildschirm wurden direkt aus der organischen Chemie von Professor Fels vorgeschlagen und konnten mit Hilfe einer einfach zu bedienenden interaktiven Software gelöst werden:

Aufgabe 1: „Zählen Sie die Phenylringe in diesem Molekül“. Hier handelte es sich um ein „kleines“ Molekül (bis zu 50 Atomen), in dem diese speziellen Atomgruppen identifiziert werden mußten.

Aufgabe 2: Identisch mit Aufgabe 1, doch handelte es sich hier um ein „komplexes“ Molekül (ab 400 Atomen).

Aufgabe 3: „Welches Atom liegt am weitesten vorne und welches am weitesten hinten?“ In dieser Aufgabe mußten räumliche Positionen unterschiedlicher Atome miteinander verglichen werden.

Aufgabe 4: Identisch mit Aufgabe 3, allerdings mit einem komplexen Molekül.

Aufgabe 5: „Positionieren Sie den Phenylring so, daß er parallel zur Bildschirmoberfläche liegt.“ Diese Aufgabe kann durch eine Rotation des Moleküls im Raum gelöst werden.

Aufgabe 6: „Zählen Sie die Phenylringe in diesem Molekül.“ In dieser Aufgabe ist die Tiefeninformation im Gegensatz zu den anderen Aufgaben nicht relevant.

**Das Experiment und die statistische Auswertung**

Ein Experiment mit 81 Testpersonen zum Vergleich der traditionellen perspektivischen Darstellung mit der kostengünstigen Rot-grün-(Anaglyph-)Darstellung und der teureren Shutter-Brille wurde durchgeführt. Die zu prüfende Hypothese lautete: „Die Darstellung im Shutter-Brillen-Modus erlaubt eine genauere und schnellere Bearbeitung der Aufgaben als die anderen beiden Darstellungsmodi.“ Da die Shutter-Brille subjektiv den besten Stereoeindruck ermöglichte, wurde eine Erfüllung der Hypothese erwartet. Mit besonderer Spannung wurde aber das Abschneiden der unterschiedlichen Darstellungsmodi im genauen zahlenmäßigen Vergleich erwartet. Das Aufsetzen des Experiments bedingte eine genaue Kontrolle über alle möglichen Nebeneffekte, welche bei solchen Experimenten bei nicht sorgfältiger Arbeit auftreten, z.B. - Lerneffekte bei Beantwortung einer Aufgabe, welche schon die

Beantwortung der nächsten beeinflussen kann;  
 - nicht beabsichtigte Unterschiede zwischen den Teilnehmergruppen, die bei der Auswertung als gleichwertig miteinander verglichen werden;  
 - ungewollte Veränderungen der Testumgebung für unterschiedliche Testpersonen, z.B. Ein-/Ausschalten von Lichtquellen, welche einen Glanzlichteffekt am Bildschirm bewirken.  
 Jede Testperson hatte vor der eigentlichen Testphase maximal zehn Minuten Zeit, sich mit der Testumgebung und dem Stereosehen vertraut zu machen. Dabei wurde ein Beispielmolekül gezeigt und die Bedienung der Software erklärt. Diese Bedienung beschränkte sich im wesentlichen auf die Rotation der Moleküle am Bildschirm. Bei dem verwendeten Arbeitsplatz handelte es sich um eine Indigo2-Desktop-Workstation von Silicon Graphics mit einem 21-Zoll stereofähigen Monitor. Gemessen wurden die Genauigkeit der jeweils erreichten Lösung der Aufgaben und die dazu benötigte Zeit.

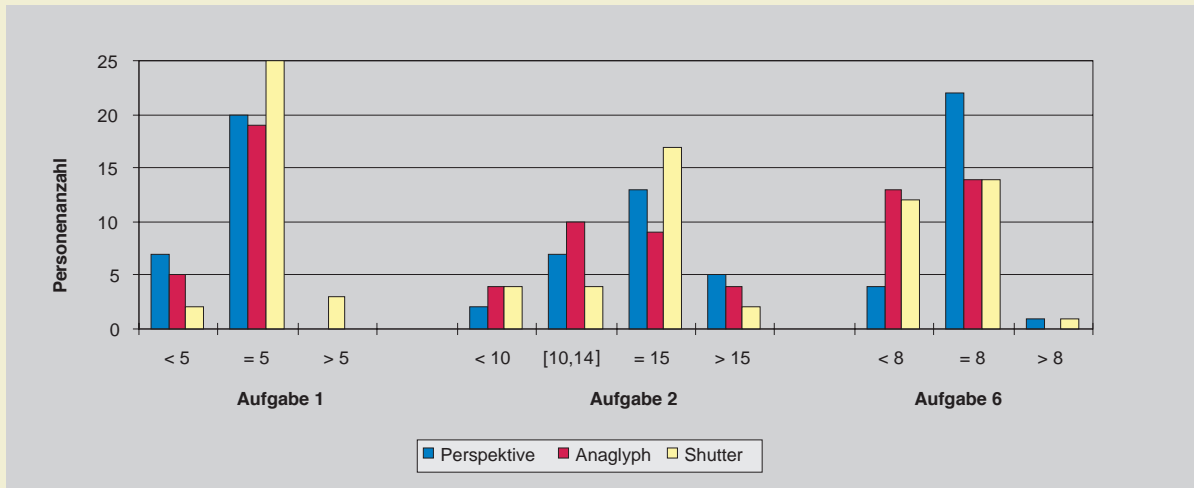


Abb. 3: Ergebnisse der Bearbeitungsgenauigkeit in Aufgabe 1 (die Antwort „=5“ war richtig) Aufgabe 2 (die Antwort „=15“ war richtig) und Aufgabe 6 (die Antwort „=8“ war richtig). In den ersten beiden Fällen schneidet die Shutter-Brille am besten ab. In Aufgabe 6 war die Tiefeninformation nicht relevant: hier zeigt sich ein Vorteil bei der perspektivischen Darstellung.

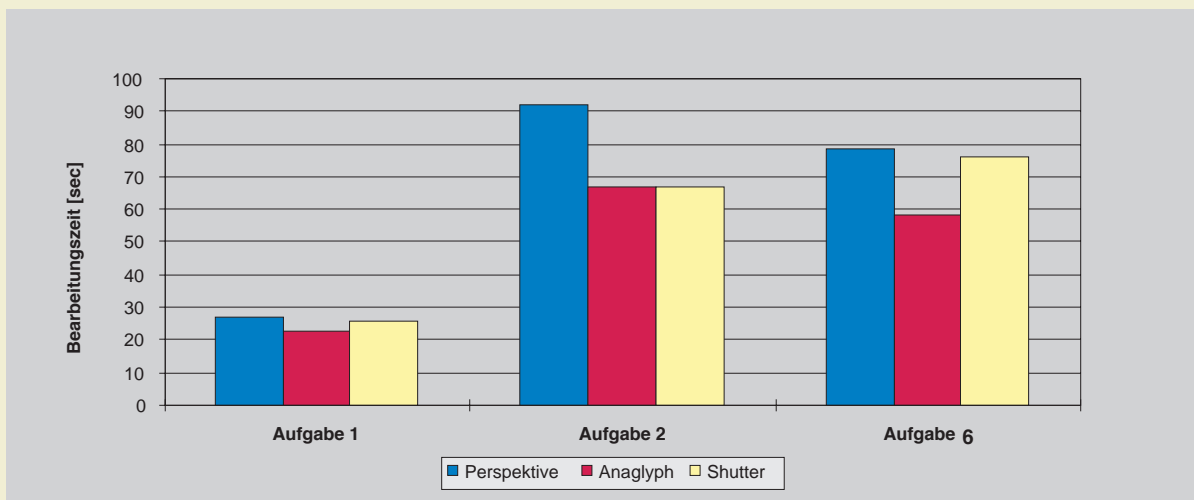


Abb. 4: Ergebnisse der Zeitmessung in den Aufgaben 1, 2, und 6. Die Ergebnisse für Aufgabe 1 unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Bei der Aufgabe 2 ist die Bearbeitungszeit der perspektivischen Darstellung signifikant höher als die der beiden Stereo-Darstellungen. Bei der Aufgabe 6 ist dagegen die Bearbeitungszeit der perspektivischen Darstellung signifikant geringer als die Zeiten der Stereo-Darstellungen. Hier war die Tiefeninformation nicht relevant.

Zur statistischen Überprüfung der oben genannten Hypothese wurde eine Varianzanalyse durchgeführt. Im Anschluß konnten mit dem „Newman-Keuls-Test“ die Mittelwerte der Ergebnisse auf signifikante Unterschiede hin überprüft werden. Eine ausführliche Beschreibung des Experiments und die genauen Parameter der statistischen Auswertung finden sich in den beiden am Ende des Beitrages aufgeführten Publikationen oder können von den Autoren angefordert werden.

**Die Resultate**

Um das interessanteste Ergebnis gleich vorwegzunehmen: Die günstige, und bei vielen schon fast vergessene, Anaglyph-Darstellung unterschied sich nicht wesentlich von der teuren Shutter-Brillen-Darstellung. Dennoch lieferte die Shutter-Brillen-Darstellung genauere Ergebnisse innerhalb einer geringeren Bearbeitungszeit. Auch die perspektivische Darstellung bot eine gute

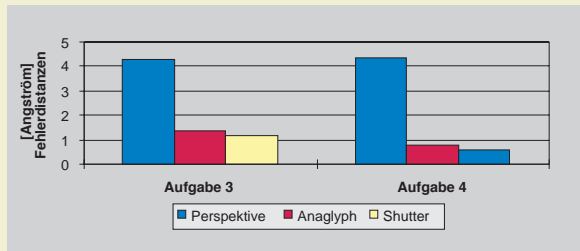


Abb. 5: Vergleich der mittleren Bearbeitungsfehler von Aufgabe 3 und Aufgabe 4. Bei beiden Aufgaben unterscheidet sich nur die perspektivische Darstellung wesentlich von den beiden ersten Darstellungen.

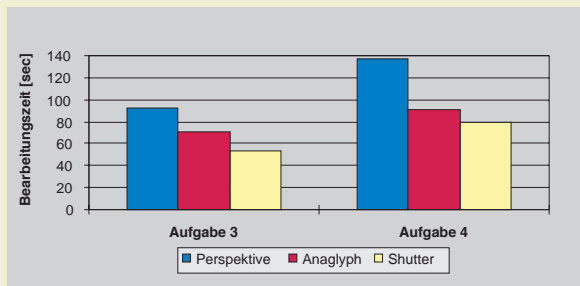


Abb. 6: Ergebnisse der Zeitmessung in Aufgabe 3 und Aufgabe 4. Für beide Aufgaben benötigten die Testpersonen bei der perspektivischen Darstellung deutlich mehr Zeit als bei den Stereo-Darstellungen. Diese unterscheiden sich nur in der 3. Aufgabe signifikant voneinander.

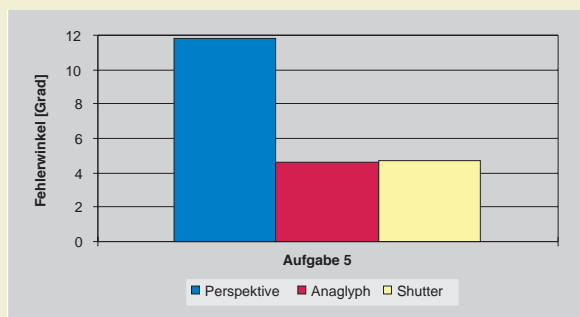


Abb. 7: Vergleich der mittleren Bearbeitungsfehler in Aufgabe 5. Die Fehlerwinkel bei der perspektivischen Darstellung sind signifikant höher als die Fehlerwinkel bei den Stereo-Darstellungen.

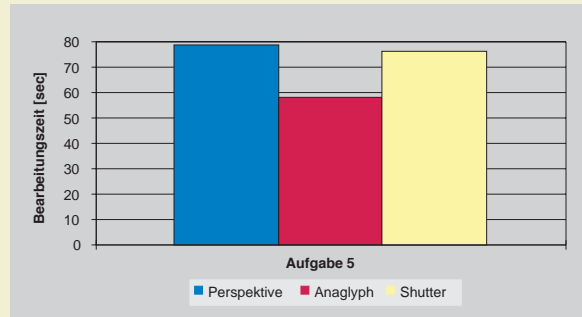


Abb. 8: Ergebnisse der Zeitmessung in Aufgabe 5. Die Bearbeitungszeit bei der Anaglyph-Darstellung ist wesentlich geringer als bei der perspektivischen und bei der Shutter-Brillen-Darstellung.

Leistung, allerdings wurde mit zunehmender Komplexität der dargestellten Szene der Unterschied zwischen der flachen Darstellung (Perspektive) und den beiden Stereo-Darstellungen größer.

In grafischer Übersicht sind die Ergebnisse der bei der Beantwortung der Aufgaben erreichten Genauigkeiten und Bearbeitungszeiten dargestellt (Abbildungen 3 bis 8).

**Preis-Leistungs-Verhältnis**

Die Leistung des jeweiligen Darstellungsmodus wurde aus Genauigkeit und Bearbeitungszeit errechnet. Abbildung 9 zeigt den Vorteil der Anaglyph-Darstellung sehr anschaulich.

Dabei muß allerdings das Ziel des Benutzers beachtet werden. Möchte dieser nur räumliche Strukturen betrachten, in denen die Form zur Identifizierung und Interpretation einzelner Objekte ausreicht, so ist die Anaglyph-Darstellung zu empfehlen. Ist dagegen die Farbinformation zur Identifizierung und Interpretation der Objekte wichtig, kann die mit der Shutter-Brillen-Technik erzielte erhöhte Genauigkeit und geringere Bearbeitungszeit den Mehrpreis wert sein. Andererseits liegt die Vermutung nahe, daß die fallenden Hardwarepreise (vor fünf Jahren kostete die Shutter-Brille noch 3 790 Mark) und die gleichzeitig zunehmende Weiterentwicklung auf dem 3D-Markt dazu führen werden, daß Stereo-Technik die einfache perspektivische Darstellung für dreidimensionale Visualisierungen als Standard ablösen wird. Dabei wird den Technologien mehr Wert beigemessen, die auf Hilfsmittel wie Brillen verzichten können, wie z.B. der an der TU Dresden kürzlich entwickelte D4D® (2), ein autostereoskopischer Flachbildschirm für PCs.

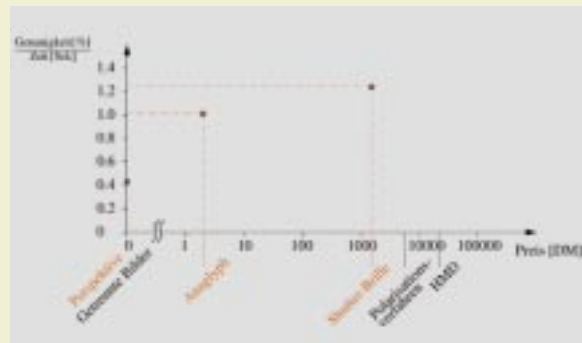


Abb. 9: Preis-Leistungs-Verhältnis für perspektivische, Anaglyph- und Shutter-Brillen-Darstellungsmodi auf einer logarithmischen Preisskala.

### Literatur

Sabine Volbracht, Gitta Domik, Khatoun Shahrabaki, Gregor Fels. How Effective are 3D Display Modes? Proceedings of CHI 1997, pp. 540-541, Atlanta, Georgia, USA.

Sabine Volbracht, Gitta Domik, Khatoun Shahrabaki, Gregor Fels. An Example of Task Oriented Empirical Evaluations of 3D-Display Modes. Journal of Universal Computer Science (J. UCS), Volume 4, Number 5, pp. 534-546, Springer Science Online, 1998.

Online-Information über das Dresdner 3D Display: HYPERLINK <http://kastor.inf.tu-dresden.de/D4D/>

Online-Information über das CAVE: HYPERLINK <http://www.pyramidvideo.com/>

Online-Information über die hier benutzten Shutter-Glas-Brillen: HYPERLINK <http://www.stereographics.com/html/products.html>

### Begriffserklärung

(1) Das „Cave Automatic Virtual Environment“, ein Produkt der Pyramid Systems, Inc.®, ist ein etwa 3m x 3m x 3m großer Raum mit hochauflösenden Stereo-Projektionen auf Wänden und Boden. Durch das Tragen einer Stereobrille können sich mehrere Personen gleichzeitig in derselben virtuellen Welt verständigen.

(2) Der D4D® zeigt beide stereoskopischen Halbbilder auf einem Flachbildschirm (Plasma- oder Flüssigkristalltechnologie). Die erste, dritte, fünfte usw. Bildspalte zeigen das linke Halbbild, die zweite, vierte, sechste usw. Bildspalte das rechte Halbbild. Daß nur jeweils ein Auge die ungeraden bzw. geraden Bildspalten sieht wird durch eine Prismafolie bewirkt, die über dem Bildschirm liegt.

# Biomechanik – der Mechanik der Natur auf der Spur

## *Simulation von Bewegungen und Beanspruchungen des menschlichen Bewegungsapparates mit Hilfe modernster Computertechnik*

„Biomechanik ist die Anwendung mechanischer Methoden und Prinzipien auf biologische Systeme, biologisches Gewebe und medizinische Probleme.“ Diese allgemeine Definition verdeutlicht die Themenvielfalt der Biomechanik. Die Biomechanik gibt Antworten auf so unterschiedliche Fragen wie: „Warum wachsen die Bäume, wie sie wachsen?“, „Wie fliegen Vögel?“, „Wie können sportliche Techniken verbessert werden?“, „Wie sieht ein Schuh aus, mit dem das Gehen nicht zur Qual wird?“, „Welche Eigenschaften muß eine Heilungshilfe besitzen, um die Heilungszeit nach einem Knochenbruch zu verkürzen?“ oder „Wie muß eine Prothese gestaltet sein, um für den Patienten eine uneingeschränkte Bewegungsfreiheit zu erreichen?“ Die Biomechanik ist eine Wissenschaft, die biologischen, medizinischen und insbesondere ingenieurmäßigen Sachverstand erfordert, so daß immer öfter Hilfe bei Ingenieuren zur Lösung der Probleme aus der Biomechanik gesucht wird.

Die Fachgruppe Angewandte Mechanik (FAM) der Universität Paderborn beschäftigt sich seit ca. drei Jahren mit der Biomechanik. Mit dem Einsatz modernster Computertechnik hat sich die Arbeitsgruppe, in enger Zusammenarbeit mit Medizinern, die Prävention von Schäden, die Abschätzung von Verletzungsrisiken und die Verbesserung von Heilungschancen nach Knochenbrüchen durch die Simulation von Beanspruchungen und Schäden am menschlichen Bewegungsapparat zum Ziel gesetzt. Motivation für die FAM, sich der Biomechanik zu widmen, war die Tatsache, daß für die Lösung der Probleme aus der Biomechanik die Finite-Elemente-Methode hervorragend geeignet ist. Bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode hat die FAM in ihren angestammten Betätigungsfeldern der Struktur- und der

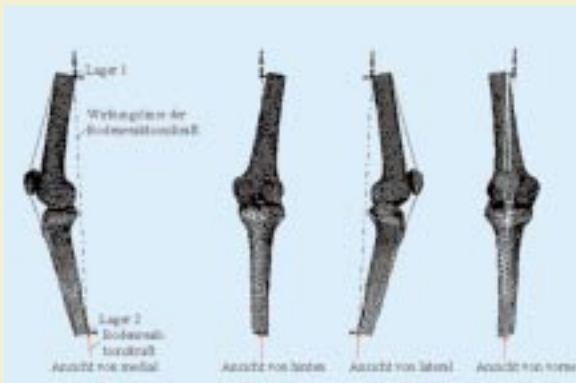


Abb. 1: Das Finite-Elemente-Modell des Kniegelenks mit Randbedingungen für die Kniebeuge.



**Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Albert Richard** ist seit 1986 Professor für Technische Mechanik im Fachbereich 10/ Maschinentechnik der Universität Paderborn. Seine Arbeitsgebiete sind Strukturmechanik, Bruchmechanik und Biomechanik.

Bruchmechanik bereits einschlägige Erfahrungen gesammelt. Außerdem wird durch die rasante Entwicklung der Leistungsfähigkeit der Rechner und der Finite-Elemente-Programme in der heutigen Zeit die Beanspruchungssimulation des menschlichen Bewegungsapparates erst umfassend möglich.

### Die Finite-Elemente-Methode: ein vielseitiges Werkzeug zur Lösung von Ingenieurproblemen

Bei der Finite-Elemente-Methode wird die Geometrie der zu untersuchenden Struktur in kleine Quader oder Tetraeder, die sogenannten finiten Elemente, zerlegt (Abbildung 1), wobei es prinzipiell keine Einschränkungen bezüglich der Form der Struktur gibt. Die Elemente sind an einzelnen Punkten, den Knoten, miteinander verbunden. Durch Lösungsansätze für die gesuchten Beanspruchungen, bezogen auf die einzelnen Elemente, wird die Beanspruchung für die gesamte Struktur in Abhängigkeit der äußeren Belastungen ermittelt. Dabei entstehen große lineare Gleichungssysteme, vielfach mit mehreren zehntausend Unbekannten. Bei hochgradig nichtlinearen Problemen, wie sie in der Biomechanik häufig auftreten, müssen diese Gleichungssysteme oft mehrere hundertmal gelöst werden, wozu modernste leistungsfähige Rechner dringend erforderlich sind.

### Von der Radiologie über die Biomechanik zur Chirurgie

Im Gegensatz zu den meisten technischen Anwendungen, bei denen die Abmessungen in Form von technischen Zeichnungen oder gar CAD-Daten vorliegen, ist man bei der Untersuchung von Knochen auf andere Methoden angewiesen. Außerdem ist die Knochengeometrie von Patient zu Patient verschieden. Die FAM hat sich das Ziel gesetzt, individuell angepasste Lösungen z.B. für eine Prothese oder ein Implantat zu entwickeln. Deshalb muß die Knochengeometrie des jeweiligen Patienten ermittelt



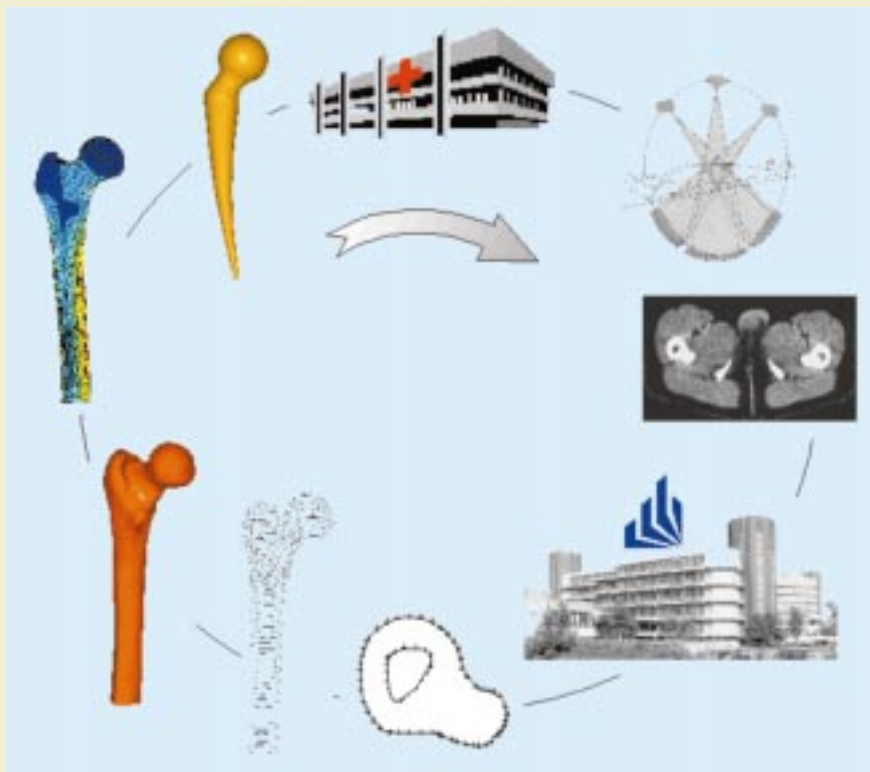


Abb. 2: Angestrebter Ablauf einer biomechanischen Analyse zur Fertigung individuell angepasster Prothesen.

und möglichst automatisch in finite Elemente eingeteilt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden bei der FAM Computertomographiedaten (CT-Daten) aus der medizinischen Praxis verwendet. Die für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendige Unterstützung durch die Bereitstellung von CT-Daten erhält die FAM von den radiologischen Abteilungen der Krankenhäuser und von der U.S. National Library of Medicine (The Visible Human Project). Die enge Zusammenarbeit zwischen der FAM und medizinischen Einrichtungen bildet die Basis für den in Abbildung 2 dargestellten, von der FAM angestrebten Ablauf einer biomechanischen Analyse. In der radiologischen Abteilung des Krankenhauses werden Computertomographieaufnahmen des betroffenen Körperteils erstellt. Mit Hilfe dieser Daten werden bei der FAM an der Universität Paderborn die Knochenkonturen rekonstruiert und daraus wird ein Finite-Elemente-Modell erzeugt. Aufgrund der Finite-Elemente-Analysen wird z.B. eine individuell angepasste Prothese oder ein Implantat entwickelt, gefertigt und dann dem jeweiligen Patienten in der chirurgischen Abteilung des Krankenhauses eingesetzt.

### Vom Computertomographiebild zum Finite-Elemente-Modell

Computertomographiedaten sind Abbildungen der Dichteverteilung in einer ebenen Körperschicht mit konstanter Dicke. Da sich Knochen aufgrund ihrer hohen Dichte im CT-Bild deutlich von den umliegenden Weichteilen unterscheiden und die Bilder als digitale Daten vorliegen, ist es der FAM gelungen, mit Hilfe selbst erstellter Programme Knochenkonturen aus CT-Daten zu rekonstruieren. Obwohl es aufgrund der rekonstruierten Knochenkonturen mittels des kommerziellen Datenvisualisie-

rungsprogramms AVS/Express gelingt, sehr anschauliche Oberflächendarstellungen der herausgefilterten Knochenpartien zu erzeugen (Abbildung 3), stellt die erforderliche Einteilung der Knochengeometrie in finite Elemente eine große Herausforderung an die Kreativität der FAM dar.

Zur Erstellung der Finite-Elemente-Modelle auf Basis von CT-Daten geht die FAM u.a. folgender Methode nach: Mit Hilfe des kommerziellen CAD-Programms I-DEAS™ werden aus den Oberflächenpunkten einzelne Schichten und daraus das dreidimensionale CAD-Computermodell erzeugt (Abbildung 4). Insbesondere die Erzeugung des dreidimensionalen Modells erfordert jedoch noch sehr viel Handarbeit und ist dadurch sehr zeitintensiv. Deshalb ist es ein zukünftiges Ziel der FAM, diesen Arbeitsschritt möglichst zu automatisieren. Das CAD-Modell selbst

kann jedoch mit I-DEASTM™ automatisch in Tetraederelemente eingeteilt und mit entsprechenden Randbedingungen versehen werden. Damit erhält man ein Finite-Elemente-Modell, wie es z.B. in Abbildung 1 dargestellt ist.

### Erforschung von Vorsorgemaßnahmen mit der Finite-Elemente-Methode

Sowohl sportliche Betätigung als auch alltägliche oder berufliche Belastungen führen häufig zu Verletzungen und Verschleißerscheinungen am Bewegungsapparat. Modessportarten wie Tennis und Golf bergen die Gefahr, durch falsche Bewegungsabläufe bzw. Fehlbelastungen dauerhafte Verschleißerkrankungen hervor-



Abb. 3: Aus CT-Daten rekonstruierte Knochenkonturen für einen Teil der Lendenwirbelsäule.

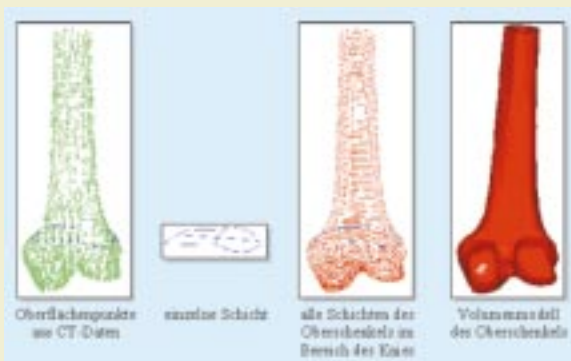


Abb. 4: Die Erstellung eines CAD-Modells für den unteren Teil des Oberschenkelknochens.

zurufen. Lauf- und Ballsportarten, die abrupte Richtungswechsel erfordern, stellen eine außerordentliche Belastung insbesondere für das Kniegelenk dar. Übergewichtige Personen sowie Personen mit Bewegungsmangel leiden häufig unter Gelenkverschleiß, wobei das Kniegelenk in besonderem Maße betroffen ist. Zur Beurteilung der Verletzungsrisiken und zur Erforschung von Vorsorgemaßnahmen ist zunächst die Kenntnis der Beanspruchungen des gesunden Bewegungsapparates bei normaler Belastung erforderlich. Hierzu dient das Finite-Elemente-Modell für die Kniebeuge in Abbildung 1.

### Simulation der Kniebeuge mit der Finite-Elemente-Methode

Wie die Schnittdarstellung des Kniegelenks in Abbildung 5 zeigt, gehören zu dem Kniegelenk u.a. der Oberschenkelknochen, das Schienbein und die Kniescheibe. Von wesentlicher Bedeutung für die Mechanik des Kniegelenks sind auch der Oberschenkelmuskel, der am oberen Rand der Kniescheibe angreift und das Bein streckt, und das Kniescheibenband, das die Kniescheibe mit dem Schienbein verbindet. Daraus ergibt sich das in Abbildung 5 dargestellte mechanische Modell, das wiederum als Grundlage



Abb. 5: Schnittdarstellung des Kniegelenks und mechanisches Modell für die Kniebeuge.

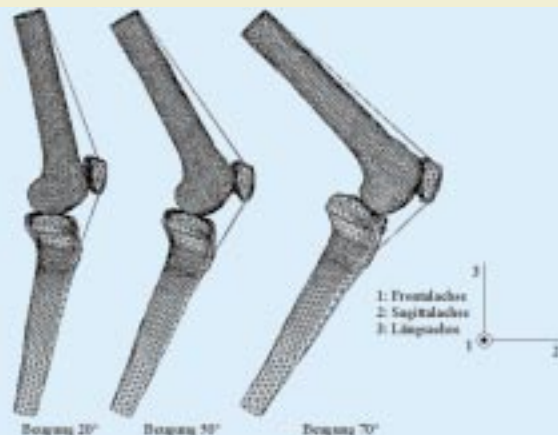


Abb. 6: Durch Finite-Elemente-Simulation berechnete Beugestellungen für das Kniegelenk.

für das Finite-Elemente-Modell in Abbildung 1 dient. Bei der Kniebeuge wird der Oberschenkelmuskel verlängert, wobei die Bodenreaktionskraft konstant bleibt. Diese Kraft entspricht dem Teilkörpergewicht mit dem der Fuß während der Kniebeuge auf die Standfläche gedrückt wird.

Zusätzlich zu der berechneten Bewegung des Kniegelenks (Abbildung 6) werden bei den Berührungsstellen zwischen den einzelnen Knochen während der Finite-Elemente-Simulation die Kontaktspannungsverteilungen ermittelt. Mit Hilfe solcher Finite-Elemente-Studien können z.B. die Veränderungen der Relativbewegungen der einzelnen Knochen des Kniegelenks zueinander und die Auswirkungen auf die Kontaktspannungen infolge einer Verletzung des Bandapparates simuliert werden.

### Weitere Aktivitäten der FAM in der Biomechanik

Außer mit den oben beschriebenen Themen beschäftigt sich die FAM im Rahmen der Biomechanik intensiv mit der Automatisierung der Finite-Elemente-Netzgenerierung auf der Basis von Computertomographiedaten und der Entwicklung einer intelligenten Heilungshilfe zur Verkürzung der Heilungsdauer nach Knochenbrüchen. Aus diesen Forschungsthemen sind bereits einige anwendungsorientierte Projekte in Zusammenarbeit mit Krankenhäusern entstanden. Hierbei handelt es sich u.a. um die Optimierung eines Sprunggelenkimplantats und um die Vorhersage der Auswirkungen auf das Ausmaß der Unterarmdrehung durch operative Korrekturen der Achse krankhaft verkrümmter Unterarmknochen.



**Dr.-Ing. Gunter Kullmer** ist seit 1987 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Angewandte Mechanik. „Biomechanische Analysen des menschlichen Bewegungsapparats mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode“ sind Thema seiner Habilitationsschrift aus dem Bereich der Biomechanik.



# The Millenium-Bug

## *Software-Haftungsrisiken zu Beginn des neuen Jahrtausends*

Für Softwarehersteller wie für Anwender ist der Jahrtausendwechsel ein magisches Datum, dessen Herannahen mit zunehmender Nervosität gesehen wird. Eine unübersehbare Zahl von Programmen ist für diesen Wechsel nicht gerüstet.

### **Der Jahrtausendfehler**

Leistungsstörungen und daraus folgende Gewährleistungs- und Schadensersatzansprüche gegen Softwarehersteller bilden – wie die Praxis zeigt – neben dem urheberrechtlichen Schutz für Computersoftware einen ganz wesentlichen Schwerpunkt im Bereich des Computerrechts.

Das Spektrum haftungsrechtlicher Probleme aufgrund fehlerhafter Software dürfte in absehbarer Zeit um eine zusätzliche Variante erweitert, denkbare Rechtsstreitigkeiten und Diskussionen um einiges schärfer geführt werden. Auslöser ist, daß weltweit eine unübersehbare Vielzahl von Computer-Programmen die Jahreszahl 2000 nicht verarbeiten kann und deshalb zur Jahrtausendwende fehlerhafte Ergebnisse mit weitreichenden Konsequenzen zu erwarten sind. Die Rede ist vom Millenium-Bug, dem sogenannten Jahrtausendfehler.



**Professor Dr. Jur. Dirk M. Barton** ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsrecht und Medienrecht im Fachbereich 5/Wirtschaftswissenschaften der Universität Paderborn. Er war früherer Hauptgeschäftsführer und Chefjustitiar des Bundesverbandes Deutscher Zeitungsverleger in Bonn.

Hiervon betroffen sein können alle Programme, die Datumsangaben verarbeiten. Die Sorge wächst, daß durch Datenfehler, neben Abstürzen von Buchhaltungs-, Abrechnungs- oder Fertigungssystemen, in so hochsensiblen Bereichen wie z.B. im Flugverkehr oder im medizinischen Bereich sogar lebensbedrohliche Situationen entstehen, etwa weil ein Rechner das Signal erhält, das Wartungsdatum sei überschritten und daher lebenserhaltende Systeme abschaltet.



Foto: Tony Stone Bilderweiten



Auf Softwarehersteller könnten weltweit durch Personen- wie Sachschäden bei Anwendern Schadensersatzansprüche in immenser Höhe zukommen. Allein der finanzielle Anpassungsaufwand für die Änderung der Programme, die mit einem Millennium-Bug behaftet sind, wird auf vierstellige Milliardenbeträge geschätzt. Für Software-Hersteller stellt sich damit die Frage, mit welchen Rechtsfragen sie im einzelnen konfrontiert werden können und zu welchen Maßnahmen sie im Vorfeld dieser Entwicklungen gegebenenfalls rechtlich veranlaßt sind, um Schadensersatzforderungen zu vermeiden. Nachfolgend werden die denkbaren Ansprüche skizziert, ohne allerdings die Fragestellungen umfassend und detailliert zu behandeln. Dies würde den Rahmen des Beitrages überschreiten.

### Die Überlassung der Software und Ansprüche des Anwenders aus dem Recht der Leistungsstörungen

Der Millennium-Bug ist sicherlich ein neuartiges Phänomen, für das sich erst seit kurzer Zeit ein Problembewußtsein gebildet hat. In den USA bereits seit einiger Zeit diskutiert, findet dieses Thema auch in Deutschland zunehmend größere Beachtung. Dessen Rechtsfolgen ergeben sich u.a. aus dem Recht der Leistungsstörungen im Rahmen des jeweils zwischen Hersteller und Anwender geschlossenen Vertrages.

Hierbei ist zunächst von Relevanz, welcher Vertragstyp bei dem Erwerb der Software zugrundezulegen ist. Dabei ist unter dem Sammelbegriff der Software die Gesamtheit aller Arbeitsanweisungen zu verstehen, die der Hardware zur Erledigung der Aufgaben erteilt werden. Software ist also jede Art von Steuerbefehlen, d.h. die Gesamtheit aller festgelegten Funktionsabläufe der Datenverarbeitung.

Nach wohl herrschender Auffassung findet auf die Überlassung einer sog. „Individualsoftware“, die speziell auf die Bedürfnisse des einzelnen Kunden zugeschnitten ist und für diesen entwickelt wurde, das „Werkvertragsrecht“ der §§ 631 ff. BGB Anwendung. Bei „Standardssoftware“, die für marktgängige Problemstellungen und für einen breiten Nutzerkreis erstellt wird, ist das Kaufvertragsrecht gem. § 433 ff. BGB heranzuziehen. Darüber hinaus ist das Leasingrecht zu berücksichtigen.

Weisen die Programme Mängel auf, ist also die Verwendungsfähigkeit beeinträchtigt, wie dies zweifellos bei Vorliegen eines Millennium-Bugs der Fall ist, kann der Anwender u.a. Gewährleistungsansprüche i.S.d. §§ 459 ff., 633 ff. BGB geltend machen.

So erfolgt z.B. bei einem Mangel des Programms, der nach den §§ 459 ff. BGB zu behandeln ist, die Rückzahlung des Kaufpreises.

Allerdings dürften solche Ansprüche infolge der kurzen Verjährung von sechs Monaten (§§ 477, 638 BGB) für die überwiegende Zahl der durch einen Millennium-Bug Betroffenen von geringerer Bedeutung sein.

Vielmehr wird die Geltendmachung von Schadensersatzansprüchen im Mittelpunkt der Betrachtung stehen, sofern durch solche Mängel weiterreichende Schäden bei den Anwendern zu verzeichnen sind.

Dabei geht es um „Folgeschäden“, die sich aus der fehlerhaften Software ergeben, etwa weil durch den Ausfall von Buchhaltungsprogrammen Forderungen des Anwenders gegen seine Gläubiger nicht mehr rechtzeitig erhoben werden oder durch den Ausfall von Klinikcomputern Patientenschäden entstehen.

Sollte sich der Veräußerer eines Programmes des Millennium-Bugs

und seiner möglichen Konsequenzen bei der Software-Überlassung bewußt gewesen sein und den Verkauf ohne den entsprechenden Hinweis an den Käufer vorgenommen haben, so steht dem Käufer infolge des arglistigen Verschweigens des Mangels ein Schadensersatzanspruch gem. § 463 BGB zu, der erst nach dreißig Jahren verjährt.

In der Praxis dürfte allerdings ein arglistiges Verhalten nur schwer nachzuweisen sein.

In Betracht kommt jedoch ein Schadensersatzanspruch auf der Grundlage einer positiven Vertragsverletzung. Die positive Vertragsverletzung (pV) als Anspruchsgrundlage für Schadensersatz aus einer schuldhaften „Verletzung vertraglicher Pflichten“ ist zwar gesetzlich nicht geregelt, gewohnheitsrechtlich aber anerkannt. Sie umfaßt eine erhebliche Breite verschiedenster Pflichtverletzungen, die ansonsten durch das gesetzlich normierte Recht der Leistungsstörungen nicht geregelt wird. Den Software-Verkäufer treffen „Sorgfaltspflichten“, deren schuldhafte Verletzung ihm Schadensersatzbegründend zuzurechnen sind. Zu diesen zählen entsprechende Aufklärungspflichten, so z.B. auch über die Gefahr des Millennium-Bugs. Im Rahmen einer Software-Überlassung auf Zeit bestehen ebenfalls Sorgfaltspflichten gegenüber dem Anwender. Hier obliegt dem „Vermieter der Software“ eine entsprechende Prüfungspflicht, ob das Programm den sogenannten Jahrtausendfehler aufweist.

Die Durchsetzung eines solchen Schadensersatzanspruchs dürfte aussichtsreicher sein, da aufgrund der Beweislastumkehr des § 282 BGB der Hersteller bzw. Überlasser der Software in der Pflicht ist, sein Nichtverschulden für die Folgeschäden im Falle eines Rechtsstreits nachzuweisen. Allerdings unterwirft die Rechtsprechung auch Schadensersatzansprüche aus einer pV der kurzen Verjährungsfrist von sechs Monaten, sofern Folgeschäden auf einem Sachmangel beruhen, wovon im Fall eines Millennium-Bugs auszugehen ist.

Haftungsausschließende allgemeine Geschäftsbedingungen dürften dabei kaum von Bedeutung sein, da eine Haftung für grobe Fahrlässigkeit nicht ausgeschlossen werden kann.

### Außervertragliche Schadensersatzansprüche des Anwenders

Bei den außervertraglichen Schadensersatzansprüchen konzentriert sich die Betrachtung auf die Haftung nach dem „Produkthaftgesetz“, (ProdHaftG), da eine Produzentenhaftung auf der Grundlage des allgemeinen Deliktsrechts gem. § 823 Abs. 1 BGB in der Regel daran scheitern wird, daß der Anwender Vermögensschäden erleidet, die von dieser Regelung nicht unmittelbar erfaßt werden.

Die Haftung nach dem Produkthaftgesetz ist als reine Gefährdungshaftung ausgestaltet, so daß es auf ein Verschulden nicht ankommt.

Fraglich ist dabei allerdings, ob auch Computersoftware als Produkt im Sinne des § 2 ProdHaftG zu qualifizieren ist.

Während die zu einer Hardware gehörende Software als deren Bestandteil betrachtet wird und damit eine Produkteinheit darstellt, ist dagegen die Produkteigenschaft z.B. der Anwendersoftware nicht unproblematisch und heftig umstritten. Sofern hier die Produkteigenschaft sowohl bei einer Standard- wie bei einer Individualsoftware bejaht wird, gewährt das Gesetz im Falle eines Produktfehlers Schadensersatz für erlittene Sach- und Personenschäden. Handelt es sich um eine gewerbliche Nutzung

des Produkts, was bei der mit dem Millenium-Bug behafteten Software überwiegend der Fall sein dürfte, werden nur Personenschäden erfaßt. Dies könnte z.B. dann von Relevanz sein, wenn die Software im medizinischen Bereich Verwendung findet. Bei Personenschäden gibt es eine Haftungsobergrenze von 160 Mio. Mark. Reine Vermögensschäden des Anwenders, die ihm durch ein fehlerhaftes Programm entstehen, werden dagegen nicht erfaßt. Die Verjährungsfrist beträgt gem. § 13 ProdHaftG 10 Jahre ab dem Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Produkts.

**Rückruf- oder Warnpflichten des Herstellers**

Um mögliche Schadensersatzansprüche zu verhindern, bietet sich in der Praxis ein Rückruf der Programme an. Neben freiwilligen Aktionen stellt sich die Frage einer Rückrufpflicht. Umstritten ist jedoch, wie eine Rückrufpflicht, wie sie z.B. im Automobilbereich durchaus üblich ist, rechtlich begründet werden kann.

Diese Frage erhält vor allem angesichts der hohen Kostenbelastung auch für die Software-Hersteller durch das Phänomen des Millenium-Bugs eine neue Aktualität.

Im Gewährleistungsrecht des Kauf oder des Werkvertrages bzw., sofern ein Leasinggeschäft vorliegt, im Rahmen des hier anwendbaren Gewährleistungsrechts, ist eine Rückrufpflicht vom Gesetz nicht vorgesehen. Sie wird auch nicht von einer vertraglich vereinbarten oder gesetzlich vorgeschriebenen „Nachbesserung“ umfaßt. Vergleichbares gilt für die Produkthaftung. Das Produkthaftungsgesetz sieht zwar Schadensersatzansprüche gegen den Hersteller vor, kennt jedoch ebenfalls keine Rückrufpflicht als gesetzlich normierte Rechtsfolge. Indessen kann die zuständige Behörde nach dem neuen Produktsicherungsgesetz (ProdSG) gegenüber dem Hersteller den Rückruf eines in Verkehr gebrachten unsicheren Produkts anordnen, sofern eine mögliche Gefahr für die Gesundheit oder Sicherheit von Personen gegeben ist. Allerdings ist der Anwendungsbereich dieses Gesetzes relativ eng bemessen, da er nur auf privat durch den Verbraucher genutzte Produkte beschränkt ist.

Eine Rückrufpflicht läßt sich dagegen auf das „Recht der unerlaubten Handlung“ nach § 823 Abs. 1 BGB stützen, obwohl diese Regelung eigentlich nur auf den Schadensausgleich nach eingetretenem Schaden abstellt.

In der Rechtsprechung ist jedoch die Tendenz zu beobachten, eine Rückruf, zumindest aber eine Warnpflicht aus § 823 Abs. 1 BGB herzuleiten.

Eine Pflicht zum Rückruf durch den Hersteller kommt aber nur dann in Betracht, wenn weniger einschneidende Maßnahmen – wie die Warnung – die Gefahr nicht sicher beseitigen können. Daher muß im Einzelfall geprüft werden, ob das mit geringerem Aufwand verbundene Mittel der Warnung – gegebenenfalls auch eine öffentliche Warnung – ausreichend ist.

**Mitverschulden des Anwenders**

Auch wenn ersatzpflichtige Schäden entstehen, bedarf es der Klärung, ob und inwieweit ein haftungsbeschränkendes oder gar haftungsausschließendes Mitverschulden des Anwenders i.S.d. § 254 BGB gegeben ist, so z.B. wenn er in Kenntnis des vorhandenen Fehlers das Programm weiterverwendet.

**Zusammenfassung**

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, daß haftungsrechtliche Risiken im Zusammenhang mit dem in vielen Bereichen zu erwartenden Millenium-Bug für die Software-Hersteller durchaus – wenn auch in sehr differenzierter Form – vorhanden sind. Dabei sind in diesem Rahmen nicht die strafrechtlichen Folgen angesprochen, die die verantwortlichen Organe eines Herstellers treffen können, wenn durch ein Programm mit einem Millenium-Bug Personenschäden zu verzeichnen sind.

**Literatur**

Computerrechts-Handbuch, Computertechnologie in der Rechts- und Wirtschaftspraxis, 1996.  
 Brandi-Dohrn, Gewährleistung bei Hard- und Softwaremängeln, 2. Auflage 1994.  
 BGHZ 102, 135.  
 BGH, Neue juristische Wochenschrift 1987, 1259.  
 Kullmann, Aktuelle Rechtsfragen der Produkthaftung, 4. Auflage.  
 OLG Frankfurt, Versicherungsrecht 1991, 1184.  
 Marly, Software-Überlassungsverträge.

**Denkbare Folgen des Millenium-Bugs**

**Gesundheitswesen**

Rechner erhält das Signal, daß das Wartungsintervall um 100 Jahre überschritten ist und schaltet lebenserhaltende Systeme ab

**Versicherungswesen**

Fehlerhafte Provisions- und Rabattberechnungen

**Logistik und Administration**

- zeitabhängige Inspektions- und Wartungssysteme werden abgeschaltet, da Wartungsintervalle überschritten sind (Aufzüge, Kühlaggregate etc.)

- Auftragsbearbeitung, Lohn- und Finanzbuchhaltung wird für längere Zeit unterbrochen



# Sozio-ökonomische Analyse der Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland

*Was bringt eine Fußball-WM für den Standort Deutschland?*

Eine sozio-ökonomische Analyse der Fußball-Weltmeisterschaft 2006 gibt Antwort auf die Frage, ob es sich nach allgemein überprüfbaren Kriterien für die Bundesrepublik Deutschland lohnt, ein solches internationales „Mega-Event“ im eigenen Land auszurichten. Die Frage wurde durch eine systematische Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen im Rahmen eines umfassenden Analyseansatzes beantwortet. Dazu wurden in einer erweiterten Kosten-Nutzen-Analyse die direkt und indirekt in Geld meßbaren, quantitativen Größen ermittelt und mit qualitativen Wirkungen aus einer überökonomischen gesellschaftlichen Sichtweise verknüpft. Die Ergebnisse liefern allgemein eine fundierte Entscheidungshilfe für die politisch Verantwortlichen und im besonderen konkrete Handlungshinweise für eine erfolversprechende Durchführung der WM. Der Bericht stützt sich auf das als Literatur angegebene Projekt eines Paderborner Forschungsteams im Auftrag des Deutschen Fußball-Bundes.



**Prof. Dr. Bernd Rahmann** ist seit 1980 Professor für Volkswirtschaftslehre und Finanzwissenschaft im Fachbereich 5/Wirtschaftswissenschaften der Universität Paderborn. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen dezentrale öffentliche Finanzwirtschaften, Staat als Arbeitgeber, öffentliche Verschuldung und Sportökonomie.

Die gesellschaftliche Perspektive bezieht politische Funktionen und Dysfunktionen in die Betrachtung ein. Eine Vielfalt politischer Handlungsfelder ist somit vor dem Hintergrund der vorherrschenden Gesellschaftswerte und -tendenzen einzuordnen



Olympia-Stadion Berlin: Die größten Investitionen und damit höchsten Risiken sind mit dem Neubau bzw. der Renovierung der Stadien verbunden. Als ein „Sorgenkind“ gilt das marode Olympiastadion von Berlin, das mit einem beachtlichen Aufwand für die WM überholt werden mußte.

Quelle: by HORIZONT



Stadion Leverkusen im Flutlichtschein: Unter Experten wird das Leverkusener Friedrich-Haberland-Stadion, welches jüngst aus Sponsoring-Gründen in „BayArena“ umbenannt wurde, als ein Vorzeigebauwerk für moderne Arenen gehandelt.

und abzuwägen. Hierzu zählen gesundheitliche, politische, soziale, pädagogische, ethische und ökologische Wirkungen, die teils in Einklang, teils im Widerspruch zu den in der deutschen Gesellschaft vorherrschenden Werten und Normen stehen. Die qualitative Analyse umfaßt zwei Komponenten: (1) mittelbare Wirkungen durch das Ereignis Fußball-Weltmeisterschaft, die typische Funktionen des Fußballsports verstärken, aber auch Dysfunktionen hervorbringen, sowie (2) unmittelbare ereignisorientierte Wirkungen auf Wirtschaft, Fußballsport und Gesellschaft.

**Nutzung gesellschaftlicher Chancen unter Minimierung der Risiken**

Inwieweit die Fußball-Weltmeisterschaft insgesamt förderlich wirken kann, ist von der zielgerichteten Gestaltung der institutionellen Rahmenbedingungen, aber auch von erfolgreichen politischen Instrumenten zur Minimierung der Dysfunktionen abhängig. Nur so wird es den identifizierten Interessenträgern – Wirtschaft, (Fußball-)Verbände und Staat – gelingen, die für sich selbst reklamierten Gesellschaftsfunktionen zu erfüllen. Eine wichtige Voraussetzung liegt in der vorbildlichen Veranstaltungsorganisation und – damit eng zusammenhängend – in der Gewährleistung eines störungsfreien Ablaufes. Wichtig zur Erfüllung der verschiedenen sozio-ökonomischen Funktionen ist, daß politische, soziale und ökologische Zielsetzungen a priori nicht hinter den ökonomischen Interessen zurückbleiben. Auf der positiven Seite sind beispielsweise die Völkerverständigung, die Identifikation mit sportlichen Werten, wie etwa Spannung, Leistung und Fairness etc., sowie die touristische und wirtschaftliche Außendarstellung des Ausrichterlandes hervorzuheben.

Risiken stellen demgegenüber Attentate, Hooliganismus, Mißbrauch des Sports für politische Zwecke, Doping sowie übermäßige sportliche Härte und dergleichen dar. Gegenmaßnahmen zur Eindämmung dieser negativen Effekte liegen vor allem in präventiven Maßnahmen, wie Fanbetreuung, internationale Koordination der Sicherheitskräfte und einem wirksamen Reglement zur Förderung der Fairness im sportlichen Wettkampf. Ein herausragendes Beispiel dafür, wie Risiken unter vertretbarem ökonomischen Ressourceneinsatz in Zukunftspotentiale umgewandelt werden könnten, ist der ökologisch, technisch und städtebaulich vorbildliche Aus- und Neubau von Stadien sowie entsprechenden Nahverkehrssystemen. Als Ergebnis der gesellschaftlichen Analyse wird festgehalten, daß die Ausrichtung einer Fußball-WM für sich allein genommen sicherlich nicht ausreicht, gesellschaftliche Probleme zu lösen oder volkswirtschaftliche Ziele vollständig zu verwirklichen. Bei Nutzung gegebener Chancen und gleichzeitiger Minimierung der Risiken ist sie allerdings ein geeignetes Mittel, um im Rahmen eines breiten Spektrums wünschenswerte ökonomische Effekte hervorzurufen und gesellschaftliche Funktionen zu erfüllen.

**Die Kosten-Nutzen-Analyse als geeignetes Instrument zur Entscheidungshilfe**

Die quantitativen, d.h. in Geldgrößen bewertbaren, gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen einer Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland können im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse am aussagefähigsten erfaßt werden. Es handelt sich dabei um einen methodischen Ansatz, der ursprünglich zur Bewertung und Entscheidungsunterstützung für weitreichende Investitionsmaßnahmen der öffentlichen Hand entwickelt wurde und darauf abzielt, ein möglichst umfassendes, exaktes Bild der zu erwartenden direkten und indirekten projektbedingten Kosten und Nutzen zu liefern. Diese Analyse hat den Vorteil, qualitative sozio-politische Aspekte gleichberechtigt mit quantitativen ökonomischen Wirkungen in einem geschlossenen Untersuchungsrahmen zusammenführen zu können. Die Anwendung dieser „gesellschaftlichen Investitionsanalyse“ bietet eine Entscheidungshilfe für die politisch Verantwortlichen nach dem

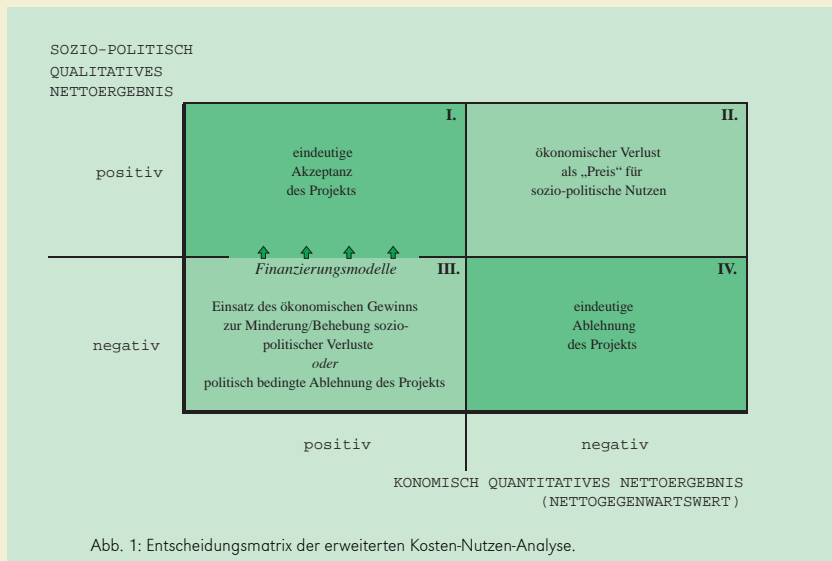


Abb. 1: Entscheidungsmatrix der erweiterten Kosten-Nutzen-Analyse.



Quelle: Pressefoto Mühlberger

Olympia-Stadion München mit der unverwechselbaren Dachkonstruktion. in Abbildung 1 dargestellten Schema.

Dabei werden die eingangs beschriebenen qualitativen Gesichtspunkte, die letztlich nur subjektiv von den politischen Entscheidungsträgern bewertet werden können, vom Analysten nach übersichtlichen Kategorien aufgeführt und dem quantitativen Nettoergebnis gegenübergestellt. Dieses kann mit Hilfe der Kosten-Nutzen-Analyse nachvollziehbar in einer einzigen, stark komprimierten Geldgröße, dem sogenannten „Nettogegegenwartswert“ (diskontierte Gesamtkosten minus diskontierte Gesamtnutzen), ausgedrückt werden.

**„Nettogegegenwartswert“ – das quantitative Gesamtergebnis aus heutiger Sicht**

Eine besonders interessante Entscheidungskonstellation ergibt sich immer dann, wenn das quantitative Nettoergebnis positiv ist und die qualitative Gesamtbewertung der Verantwortlichen tendenziell negativ ausfällt (Abbildung 1, Feld III.). Einerseits könnten sich die Entscheider in einem solchen Falle aus politischen Gründen gegen das Projekt aussprechen. Andererseits ist es aber ökonomisch möglich, den potentiell hohen gesellschaftlichen Risiken mit Hilfe von präventiven Maßnahmen im Rahmen einer angemessenen Risikoverteilung in öffentlich-privat gemischten Finanzierungsmodellen (sogenannten „public private partnerships“) entgegenzuwirken. Mit anderen Worten: Die durch das Projekt erwirtschafteten finanziellen Mittel werden - sowohl von öffentlichen (Gebietskörperschaften) als auch privaten Institutionen (Verbände und Investoren) - zielgerichtet eingesetzt, um der Gesellschaft die zu erwartende Wohlfahrtssteigerung unter Minimierung oder gar Ausschluß sozio-politischer Risiken zu sichern. Die zunächst negative Einschätzung des qualitativen „Nettoergebnisses“ wird so aktiv in eine positive Bewertung überführt, da die sozio-politischen Rahmenbedingungen mit Hilfe ökonomischer Ressourcen verändert werden.

Diese Möglichkeit besteht bei einem negativen ökonomischen, jedoch positiven qualitativen Nettoergebnis nicht (Abbildung 1, Feld II.). Die von den politisch Verantwortlichen festgesetzten, aus qualitativer Sicht als vorteilhaft erachteten Rahmenbedingungen sind in dieser Konstellation gerade der Grund für ein negatives ökonomisches Nettoergebnis. So sind beispielsweise ökonomische Verluste vorprogrammiert, wenn der Neubau einer oder mehrerer prunkvoller Sportarenen - möglicherweise sogar an problematischen Standorten, wie bei Olympischen Spielen und Fußball-Weltmeisterschaften in der Vergangenheit bereits geschehen - zur (sport-)politischen Außerdarstellung gewünscht wird. Ein Abweichen von dieser politischen Vorgabe hätte aber in den Augen der Entscheidungsträger eine negative Gesamteinschätzung der qualitativen Projektwirkungen zur Folge, so daß ein negatives ökonomisches Nettoergebnis quasi als „Preis“ für die Sicherung sozio-politischer Nutzen in Kauf genommen werden muß. Ein aktuelles Beispiel für einen solchen Fall bietet die Weltausstellung in Hannover.

**Simulation der Auswahl von 10 Spielorten**

Abgesehen von den bei Wirtschaftsprognosen üblichen Unsicherheiten über die zukünftigen ökonomischen Rahmenbedingungen steht die Berechnung der zu erwartenden gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen einer Fußball-Weltmeisterschaft in Deutschland im Jahre 2006 zum jetzigen Zeitpunkt vor dem zusätzlichen methodischen Problem, daß die Spielorte bzw. Stadien, in denen die Begegnungen ausgetragen werden sollen, noch nicht genau bekannt sind. Diese Schwierigkeit kann mit einer Simulation der Auswahl von 10 Spielorten, die voraussichtlich für die Austragung von 64 Spielen bei 32 Endrundenteilnehmern in zunächst 8 Gruppen analog zu dem Muster der WM 1998 in Frankreich erforderlich sind, bewältigt werden. Dazu wird eine Portfolio-Technik angewandt, die zum einen (Angebotsseite) den vermutlichen Investitionsbedarf für den Stadion-Ausbau oder -Neubau im Hinblick auf die bereits vorhandene Sport-Infrastrukturausstattung und die von der FIFA gesetzten

**NACHFRAGEPOTENTIAL**

		<b>I.</b>	<b>II.</b>	<b>III.</b>
<b>hoch</b>	kurzfristig: N < K, hohe Investitionen	kurzfristig: N = K, mittlere Investitionen	kurzfristig: N > K, geringe Investitionen	
	langfristig: N > K, starke Nachnutzung	langfristig: N > K, starke Nachnutzung	langfristig: N > K, starke Nachnutzung	
<b>mittel</b>	kurzfristig: N < K, hohe Investitionen	kurzfristig: N = K, mittlere Investitionen	kurzfristig: N > K, geringe Investitionen	<b>VI.</b>
	langfristig: N = K, mittlere Nachnutzung	langfristig: N = K, mittlere Nachnutzung	langfristig: N = K, mittlere Nachnutzung	
<b>niedrig</b>	kurzfristig: N < K, hohe Investitionen	kurzfristig: N = K, mittlere Investitionen	kurzfristig: N > K, geringe Investitionen	<b>IX.</b>
	langfristig: N < K, geringe Nachnutzung	langfristig: N < K, geringe Nachnutzung	langfristig: N < K, geringe Nachnutzung	
	<b>niedrig</b>	<b>mittel</b>	<b>hoch</b>	

mit: N = Nutzen, K = Kosten

**VORHANDENE (SPORT-)INFRASTRUKTURAUSSTATTUNG**

Abb. 2: Neun-Felder-Matrix der Spielorte.



SZENARIEN (gemäß Abb. 2)	VERTEILUNG DER SZENARIEN BEI 10 SPIELORTEN					
	HYPOTHESE I. Maximal		HYPOTHESE II. Mittel		HYPOTHESE III. Minimal	
Szenario 1 (III.)	3		2		1	
Szenario 2 (II., VI.)	4		3		2	
Szenario 3 (I., V.)	2		3		4	
Szenario 4 (IV., VIII.)	1		2		3	
erwarteter NETTONUTZEN	sicher positiv		wahrscheinlich positiv		unsicher wahrscheinlich negativ	
BEWERTUNG	Schätzintervall $H_I$		Schätzintervall $H_{II}$		Schätzintervall $H_{III}$	
	obere Grenze $H_{I,o}$	untere Grenze $H_{I,u}$	obere Grenze $H_{II,o}$	untere Grenze $H_{II,u}$	obere Grenze $H_{III,o}$	untere Grenze $H_{III,u}$
NETTOGEGENWARTSWERT	NGW ( $H_{I,o}$ )	NGW ( $H_{I,u}$ )	NGW ( $H_{II,o}$ )	NGW ( $H_{II,u}$ )	NGW ( $H_{III,o}$ )	NGW ( $H_{III,u}$ )
FALLUNTERSCHIEDUNG	„best case“		realistischer Bereich			„worst case“

Tab. 1: Hypothesen über die Szenarierverteilung bei 10 Spielorten.

Anforderungen sowie zum anderen (Nachfrageseite) eine geschätzte Inanspruchnahme der Stadien auch nach der WM berücksichtigt. Zum Zwecke der Kategorisierung von Elementen reicht es aus, zunächst qualitative Bewertungen mit den Ausprägungen *niedrig*, *mittel* und *hoch* zu bilden, so daß die in Abbildung 2 dargestellten 9 Kombinationen entstehen, deren Kosten und Nutzen sowohl kurzfristig als auch langfristig unterscheidbar sind.

Nach plausiblen Überlegungen scheiden zunächst das Feld VII. (als praktisch nicht wünschenswert) und das Feld IX. (als realiter nicht existent) aus, so daß 7 Felder verbleiben, mit denen 4 Szenarien gebildet werden:

- Szenario 1 (mit Feld III.): beste Situation mit sicherem Nutzenüberschuß
- Szenario 2 (mit II. und VI.): gute Situation mit wahrscheinlichem Nutzenüberschuß
- Szenario 3 (mit I. und V.): unsichere Situation mit möglichem Kostenüberschuß
- Szenario 4 (mit IV. und VIII.): schlechte Situation mit wahrscheinlichem Kostenüberschuß

Die hypothetische Zusammensetzung der 10 Spielorte wird nun aus diesen Szenarien systematisch gemischt und zwar so, daß zunächst eine mittlere, normal-verteilte Mischung (Hypothese II.) gewählt wird und sodann durch gleichmäßige Abänderungen zum einen daraus eine maximale Mischung (Hypothese I.) und zum anderen schließlich eine minimale Mischung (Hypothese III.) resultiert. Zusätzlich werden bei der Quantifizierung der berechneten Einflußgrößen für Kosten und Nutzen Bandbreiten mit oberen (günstige Schätzung) und unteren Grenzwerten (ungünstige Schätzung) für alle Szenarien eingeführt. Daraus entsteht eine weitere Spreizung bzw. Differenzierungsmöglichkeit der Hypothesen, und es ergibt sich auf der einen Seite ein „best case“, der wahrscheinlich kaum zu übertreffen sein dürfte, sowie

auf der anderen Seite ein „worst case“, der sicher nicht unterschritten werden kann. Im Zwischenbereich liegen alle übrigen realistischen Hypothesen, wie Tabelle 1 zeigt.

### Quantifizierung der Haupteinflußfaktoren und gesamtwirtschaftliches Nettoergebnis

Sind die Spielorte später definitiv bekannt, kann die Mischung mit Hilfe dieses Schemas konkret vorgenommen und dann auch genauer berechnet werden. Über „best“ oder „worst“ bestimmen dann allein die Schätzintervalle für die quantifizierten Variablen und nicht mehr unterschiedliche Hypothesen bezüglich der Szenarierverteilung. Bei der Quantifizierung der in das so konstruierte Modell eingehenden Einflußfaktoren wird auf vergleichbare Werte aus der verfügbaren Fachliteratur, auf Erfahrungen aus der Praxis sowie auf plausible Annahmen zurückgegriffen. Betrachtet wird der Zeitraum vom Jahr 2000 (möglicher Zuschlag der WM 2006 an Deutschland als Ausrichtungsland) bis zum Jahr 2015. So können die Effekte der Vorbereitung und die ökonomischen Folgewirkungen der Veranstaltung in einem angemessenen Umfang berücksichtigt werden. Konkret gerechnet wird mit

- Investitionen, die zugleich Kosten und im Wirtschaftskreislauf multiplikativ verstärkte Einkommen bereits vor der Veranstaltung (Prä-Event-Phase) hervorbringen sowie die Höhe der aufzunehmenden Kredite bestimmen,
- Kreditkosten nach der WM (Post-Event-Phase), die sich aus Tilgung und Verzinsung zusammensetzen,
- Nutzenrückflüssen aus der Sportinfrastruktur (insbesondere Zuschauereinnahmen) sowie Betriebskosten der Sportstätten während der Post-Event-Phase,
- Tourismusausgaben der ausländischen Besucher der WM 2006 (Präsenzphase), die wie die Investitionsausgaben über Multiplikatoren verstärkt werden,
- Multiplikatoren, die einem ökonomischen Modell entnommen wurden und die den Verstärkungseffekt wiedergeben, der durch einen Ausgabenanstoß im Wirtschaftskreislauf erzeugt wird,

- einer Schätzung für das Budget des nationalen Organisationskomitees sowie
- einem linearen Diskontfaktor in Höhe von 4 Prozent, um die zu verschiedenen Zeitpunkten auftretenden Geldgrößen miteinander vergleichbar zu machen.

Das Ergebnis des Modells ist in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt die Nettogegenwartswerte, d.h. die bis zu dem angegebenen Zeitpunkt aufaddierten (akkumulierten), durch die WM erzeugten und diskontierten Nettoerträge (Nutzen minus Kosten) in Millionen Mark zur Basis 1996. In der Prä-Event-Phase schlagen vornehmlich die Investitionen als Kosten zu Buche und erzeugen somit negative Nettogegenwartswerte, rufen jedoch gleichzeitig zusätzliche Einkommen hervor. Dadurch kommt es zu einem gesamtwirtschaftlichen Impuls, der in der Präsenzphase der WM durch Tourismusausgaben und Multiplikatorwirkungen erheblich verstärkt wird. Es zeigt sich erwartungsgemäß, daß das Nettoergebnis bei günstigen Rahmenbedingungen für die berechneten Einflußgrößen deutlich höher ausfällt als bei ungünstigen Rahmenbedingungen, wobei die durch die Folgekosten der Stadienunterhaltung und Kapitalkosten der Kreditfinanzierung geprägte Post-Event-Phase eine herausragende Rolle spielt (langfristige Effekte).

**Eine optimistische und eine vorsichtige Interpretation der Ergebnisse**

Bei *optimistischer Einschätzung* hinsichtlich der zukünftigen Rahmenbedingungen würde das folgende Ergebnis erwartet: Die im Vorfeld getätigten Investitionen rentieren sich gesamtwirtschaftlich schon innerhalb weniger Jahre. Es kommt während der WM zu einem beachtlichen Zustrom von Kaufkraft aus dem Ausland, und die Folgekosten aus den Investitionen (Kapitalkosten und Betriebskosten) werden weitgehend durch zukünftige Einnahmen der Stadien gedeckt. Somit wird die insgesamt auf die WM zurückzuführende Wohlfahrtsmehrung für den Stand-

ort Deutschland von bis zu 5 Milliarden Mark auch langfristig nur geringfügig geschmälert. Die positiven Ergebnisse der drei Hypothesen liegen relativ dicht beieinander, d.h. die Auswahl der Spielorte hätte im günstigsten Fall nur einen geringfügigen Einfluß. Das gleiche Fazit wäre auch bei dem wahrscheinlichsten Fall durchschnittlicher zukünftiger Rahmenbedingungen zu ziehen, nur auf einem etwas geringeren Niveau von etwa 2 bis 3 Milliarden DM nationaler Wohlfahrtssteigerung.

Obwohl die verschiedenen Einzelwerte in der Berechnung bereits zurückhaltend geschätzt wurden, würden ausgesprochen *vorsichtige Erwartungen* hinsichtlich der zukünftigen Rahmenbedingungen zu dem Ergebnis kommen, daß die hohen Investitionen in die Sportinfrastruktur wie auch die Ausgaben ausländischer WM-Touristen – gemessen an dem mit ihnen verbundenen Risiko – für den Standort Deutschland einen nur geringen gesamtwirtschaftlichen Impuls von höchstens einer Milliarde Mark auslösen und die Folgekosten aus der Veranstaltung mangels hinreichender Einnahmen der neuen bzw. renovierten Stadien unter Umständen schon sechs Jahre nach der WM sogar zu einer nationalen Wohlstandsminderung führen. Bei dieser pessimistischen Einschätzung kommt der Auswahl der Spielorte eine entscheidende Bedeutung zu. Bei der Wahl der Spielorteverteilung ähnlich der Hypothese I. oder nach noch positiveren Ausgangspositionen könnte auch unter ungünstigen Rahmenbedingungen ein insgesamt negatives Nettoergebnis noch vermieden werden; bei Hypothese III. erscheint ein Verlust dagegen unvermeidlich.

**Ein neues mehrdimensionales Verteilungsproblem auf vier Ebenen**

Unabhängig von einer optimistischen oder vorsichtigen Einstellung zu den Rahmenbedingungen ist in jedem Fall ein mehrdimensionales Verteilungsproblem hinsichtlich des gesamtwirtschaftlichen Nettoergebnisses zu beachten, das entscheidend für

die letztendliche Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Fußball-Weltmeisterschaft für den Standort Deutschland ist. Das volkswirtschaftliche Gesamtergebnis differenziert zunächst nicht danach, wem der Nutzen aus einer Fußball-Weltmeisterschaft zufließt. Faktisch ist aber mit unterschiedlichen ökonomischen Betroffenheiten vor allem auf den folgenden vier Ebenen zu rechnen:

(1) *Intertemporal*: Wie aus Abbildung 3 klar ersichtlich ist, treten die hohen positiven Zuflüsse vornehmlich während der Präsenzphase auf. Dagegen sind in der Prä- und Post-Event-Phase die Hauptkosten in Verbindung mit der

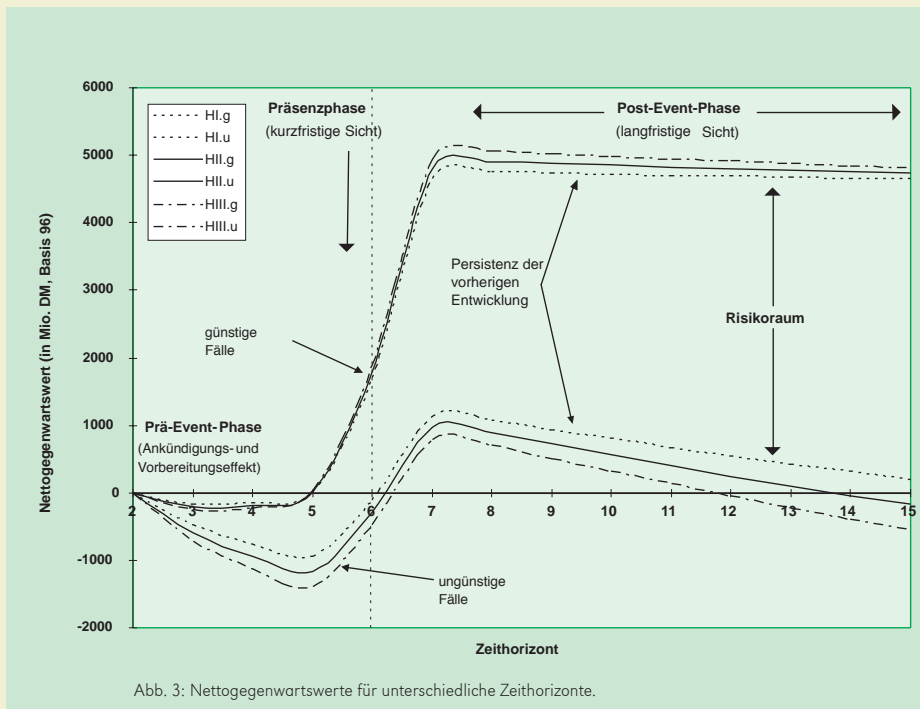


Abb. 3: Nettogegenwartswerte für unterschiedliche Zeithorizonte.



Quelle: Frank Hoffmeister

WM-Pokal: Bei einer Fußball-Weltmeisterschaft geht es bei weitem nicht nur um den begehrten Pokal als Auszeichnung für die weltbeste Nationalmannschaft. Die Durchführung einer WM stellt eine organisatorische Herausforderung dar und zieht weitreichende sozio-ökonomische Effekte für das Ausrichterland nach sich, die sorgfältig evaluiert werden sollten.

WM zu tragen. Hier liegt das Risiko vor allem bei den Investoren und Betreibern der Stadien.

(2) *Interkommunal*: Je nach örtlichen Gegebenheiten kann es unter den Kommunen mit schwächerer wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit (insbesondere die Szenarien 3 und 4 aus Abbildung 2) durchaus „Verlierer“ geben. Dennoch benötigt oder wünscht man einige solcher Spielorte, um die Gesamtzahl von voraussichtlich 10 Stadien auch unter dem politischen Gesichtspunkt der Beteiligung der neuen Bundesländer an der WM zu gewährleisten.

(3) *Interfunktional*: Wie die eingangs behandelte gesellschaftliche Perspektive zeigt, bestehen durchaus Risiken und damit möglicherweise Benachteiligungen infolge der WM im nicht-ökonomischen Bereich, die gegebenenfalls mit ökonomischen Ressourcenaufwand abzusichern wären. Dies ist vornehmlich eine staatliche Aufgabe, wobei voraussichtlich die verschiedenen Gebietskörperschaften unterschiedlich belastet werden; es ist aber ebenfalls eine Aufgabe der Sportverbände, die sich nicht zuletzt auch als Institutionen mit einer gesellschaftlichen Verantwortung verstehen.

(4) *Intersektoral*: Bisher wurden Sportstadien hauptsächlich von der öffentlichen Hand finanziert und gebaut. Vor dem Hintergrund knapper öffentlicher Kassen und auch unter dem Aspekt der Lastenverteilung zwischen dem öffentlichen und privaten Wirtschaftssektor, die beide von einer WM spürbar profitieren würden, ist dies nicht länger akzeptabel und durchführbar.

Um also idealerweise eine Wohlfahrtssteigerung „für alle“ (sogenanntes Pareto-Optimum) aus der WM zu sichern, wäre eine intertemporale, interkommunale, interfunktionale und intersektorale Kompensation von potentiellen „Verlierern“ der WM nach Maßgabe der unterschiedlichen ökonomischen Betroffenheiten vonnöten. Kann dies gewährleistet werden, wäre eine Fußball-Weltmeisterschaft 2006 mit Sicherheit höchst vorteilhaft für den Standort Deutschland, und ernsthafte Bemühungen um deren Austragung sind dann mit Nachdruck zu empfehlen.

### Die WM 1998 und die Tour de France 1998 mahnen zur Vorsicht

Bei der Vorbereitung und Durchführung solcher „Mega-Events“ ist höchste Sorgfalt sowie eine vorbildliche, professionelle Zusammenarbeit aller gesellschaftlich verantwortlichen Institutionen geboten, wie die Vorkommnisse der jüngsten Veranstaltungen anmahnen. So sind bei der WM 1998 in Frankreich ganz offensichtlich die Risiken hinsichtlich der Distribution von Eintrittskarten und des Hooliganproblems unterschätzt worden. Die ökonomischen Einbußen infolge aus Angst vor Ausschreitungen nahezu abgeriegelter Innenstädte bei einigen Spielen sowie aufgrund nicht angereister ausländischer WM-Touristen, die um ihre schon bezahlten Tickets geprellt wurden (insbesondere in Japan), sind als hoch bis sehr hoch einzuschätzen. Bei der Tour de France 1998 wurde sogar die gesamte Veranstaltung durch die negative Ausstrahlungswirkung des Dopingproblems in Frage gestellt. Hier zeigt sich die wechselseitige Bedingtheit ökonomischer und außerökonomischer Wirkungen: Politische Risiken beeinträchtigen auch den ökonomischen Erfolg, und umgekehrt ist der Einsatz ökonomischer Ressourcen nicht nur eine Garantie zur Verminderung (Beseitigung) politischer Risiken, sondern zugleich auch ein Beitrag zur Sicherung des ökonomischen Erfolgs selbst.

### Literatur

Rahmann, B., Weber, W., Groening, Y., Kurscheidt, M., Napp, H.-G., Pauli, M., „Sozio-ökonomische Analyse der Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland. Gesellschaftliche Wirkungen, Kosten-Nutzen-Analyse und Finanzierungsmodelle einer Sportgroßveranstaltung“, (Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft; Bd. 4) Köln: Sport und Buch Strauss 1998, 226 Seiten.



### Dipl.-Volkswirt Markus Kurscheidt

ist seit 1997 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich 5/Wirtschaftswissenschaften in sportökonomischen Projekten tätig. Am Lehrstuhl für Finanzwissenschaft führte er die quantitative Kosten-Nutzen-Analyse der WM 2006 durch und betreut seit Juni 1998 am Lehrstuhl für Organisation und Internationales Management ein Projekt im Bereich Sportsponsoring.



# Sex, Musik und Schach

## *Editionsprojekt Johann Jakob Wilhelm Heinse (1746-1803) am Musikwissenschaftlichen Seminar Detmold*

Am Musikwissenschaftlichen Seminar Detmold entsteht erstmals eine Edition, die sämtliche Schriften zur Musik von Johann Jakob Wilhelm Heinse (1746-1803), einem Autor auf der Schwelle von Spätaufklärung zur Frühromantik, mit Kommentar, Notenbeispielen und dokumentarischem Anhang in einer „kritischen Studienausgabe“ einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich machen wird.

### Heinse, ein klassischer Außenseiter

Mit Heines Büchern wußte die Nachwelt meist wenig anzufangen. Seine im geheimen geführten Notizhefte gelangten erst 120 Jahre nach seinem Tod an die Öffentlichkeit. Von etwa 3 650 Blättern Aufzeichnungen in 61 Heften, die heute in der Stadt- und Universitätsbibliothek Frankfurt am Main aufbewahrt werden, wurden in der bislang einzigen Auswahlgabe von Carl Schüddekopf und Albert Leitzmann (Leipzig 1903-25) etwa vier Fünftel ediert – ohne Kommentar und willkürlich nach Herausgeberlaune gruppiert.

Unter den Musikschriftstellern des späten 18. Jahrhunderts zählt Heinse jedoch zu den originellsten und gehaltvollsten. Er ist neben Herder und Reichardt der wichtigste Vorläufer der romantischen Musik- und Kunstästhetik. Hölderlin, der ihn persönlich gut kannte, nannte ihn „mein ehrlich Meister“.

Zweifelhaften Ruhm hatten dem jungen, mit Wieland, Gleim und J. G. Jacobi befreundeten Schriftsteller die Übersetzung des *Satyricon* von Petronius und ein erotischer Roman *Laidion oder die eleusinischen Geheimnisse* (1774) eingebracht: „Andere verhuren ihre Säfte, ihr habt Stenzen daraus gemacht“, äußerte sich anerkennend Goethe, der damals in Heinse noch einen Geistesverwandten sah. Nach einer dreijährigen Italienreise, während der Heinse seine Kunstkenntnisse durch lebendige



Abb. 1:  
Johann Jakob Wilhelm Heinse

Anschauung und Erfahrung vertiefte, entstanden seine Romane *Ardinghella* und *die glückseligen Inseln* (1787) und *Hildegard von Hohenthal* (1795/96): jener ein in der Renaissance spielender Kunst-, dieser ein in der Welt der italienischen Oper angesiedelter Musikroman, die beide weit ausgreifende Kunst- und Musikgespräche, Gemälde- und Kompositionsbeschreibungen, philosophische, politische und religiöse Diskussionen enthalten. Vor allem die Schilderungen freizügiger *Sexualität im Ardinghella*, die



Prof. Dr. Werner Keil studierte an der Hochschule für Musik in Frankfurt am Main Schulmusik und an der Johann Wolfgang von Goethe-Universität Frankfurt Musikwissenschaft sowie Mathematik. Seit 1997 ist er Professor für Historische Musikwissenschaft an der Universität Paderborn. Forschungsschwerpunkte: Frühromantik, Impressionismus und Klassische Moderne; Philosophie der Musik.

Vermischung von Erotik und Ästhetik, Heines sinnlich-berauschter Blick auf die Kunst der Renaissance und der Antike brachten ihn in unüberbrückbaren Gegensatz zu den Weimarer Klassikern. Von der heftigen zeitgenössischen Kritik verunsichert, als Vorleser und Bibliothekar beim Fürstbischof in Mainz in steter Sorge um seine Existenz, zog sich Heinse am Lebensende ganz ins Private zurück, widmete sich dem Schachspiel und veröffentlichte im Todesjahr noch einen Schachroman *Anastasia*, der sich seitenlang mit Eröffnungs- und Endspieltheorie befaßt.

### Vorgeschichte des Projekts

Im Frühjahr 1996 fand in Weimar aus Anlaß des 250. Geburtstags ein von der Stiftung Weimarer Klassik organisiertes internationales Heine-Symposium statt, auf dem über „Heines Beitrag zur romantischen Musikästhetik“ referiert wurde. Die anwesenden Heineforscher bedauerten übereinstimmend das Fehlen einer zuverlässigen Edition der Schriften Heines. Daraufhin reifte der Entschluß, eine Ausgabe sämtlicher Schriften Heines zur Musik in Angriff zu nehmen. 1996 wurde zunächst der Nachlaß in Frankfurt untersucht, anschließend ein entsprechender DFG-Antrag gestellt und dieser dann bewilligt. Das Projekt, das bis Ende 1997 an der Universität Hildesheim realisiert wurde, wird seit 1998 an der Universität Paderborn fortgeführt.

### Überlieferung der Schriften zur Musik

Zu Lebzeiten Heines erschien an Schriften zur Musik lediglich der Roman *Hildegard von Hohenthal* in drei Bänden in der Berliner Vossischen Buchhandlung (1795/96). Nach Heines Tod veröffentlichte 1805 J. F. K. Arnold eine Jugendschrift Heines (deren Echtheit jedoch nicht mit letzter Sicherheit erwiesen ist) unter dem Titel *Musikalischen Dialogen oder Philosophische*



Abb. 2: Die Titelseite des ersten Teils des Erstdrucks von Wilhelm Heinese Musikroman *Hildegard von Hohenthal*, Berlin 1795.

*Unterredungen berühmter Gelehrter, Dichter und Tonkünstler über den Kunstgeschmack in der Musik, ein Nachlaß von Heinese.* Beide Werke erschienen zu Beginn unseres Jahrhunderts auch in der oben erwähnten Schüddekopf/Leitzmannschen-Ausgabe. Auf die Nachlaßaufzeichnungen und ihren Wert als musikgeschichtliche Quelle ersten Ranges machte 1887 zuerst Hans Müller aufmerksam; eine Auswahl edierten wiederum Schüddekopf und Leitzmann.

### Editionsprobleme

Der große Nachteil der Schüddekopf/Leitzmann-Ausgabe hinsichtlich der handschriftlichen Notizen basiert auf der (irrigen) Annahme der Herausgeber, die Hefte seien erst nach Heinese Tod durch Heinese engsten Freund, den Frankfurter Mediziner und Naturforscher Thomas Soemmerring, zusammengebunden worden, wobei Soemmerring Datierung und Zuordnung der Aufzeichnungen durcheinandergebracht habe. Daher versuchten Schüddekopf und Leitzmann, das chaotisch wirkende Material systematisch neu zu ordnen und gruppieren es in (vermuteter) chronologischer Reihenfolge als „Tagebücher“, „Reiseberichte“ und „Aphorismen“ unter Auslassung unwichtig erscheinender Exzerpte und Abschriften.

Die neue Edition bringt die *Hildegard* und die *Musikalischen Dialogen* getreu dem jeweiligen Erstdruck – auf Modernisierung der Orthographie oder sonstige Herausgebereingriffe wird vollständig verzichtet. Beim Nachlaß ergaben eingehende jüngere Untersuchungen durch Dürten Hartmann, daß zwar die Bandnumerierungen nicht von Heinese stammen, wohl aber die Hefte als solche meist schon als „Büchelchen“ (wie Heinese sich ausdrückte) benutzt worden sind. Heinese verwendete allerdings mehrere „Büchelchen“ über Jahre hinweg nebeneinander und trug gleichzeitig von vorn wie von hinten Notizen ein; fast immer mit Bleistift in einer winzigen, schwer entzifferbaren Schrift. Die neue Edition der Paderborner Universität und des Musikwissenschaftlichen Seminars in Detmold bringt alle Aufzeichnungen zur Musik aus dem Nachlaß unverändert in der vorliegenden Reihenfolge der Hefte und unter Beibehaltung der vorhandenen Blattzählung.

### Der Musikroman „Hildegard von Hohenthal“

Im Zentrum des Romans steht die schöne, kluge und sängerisch begabte Adlige Hildegard von Hohenthal. Mit ihrem Musiklehrer, dem am Hof des Fürsten angestellten Kapellmeister Lockmann, der (hoffnungslos) in sie verliebt ist, nimmt sie zahlreiche Rezitative und Arien aus älteren und neueren meist italienischen Opern durch; musikalische Aufführungen und Gespräche über Kunst, Philosophie, Moral, Politik etc. bieten Heinese reichlich Gelegenheit, sein enzyklopädisches Wissen über Musik und Musikleben im 18. Jahrhundert auszubreiten. Im zweiten Teil des Romans flüchtet Hildegard und reist verkleidet als Kastrat nach Italien, wo ihre Gesangkunst bejubelt wird und sie nach allerlei erotischen Turbulenzen schließlich einen englischen Lord ehelicht.

Der Textkorpus der Hildegard ist bereits an der Universität Hildesheim fertiggestellt worden. (ebenso jener der *Musikalischen Dialogen*). Am Musikwissenschaftlichen Seminar Detmold wurde eine Datenbank aufgebaut mit allen im Roman vorkommenden Namen von Musikern, Künstlern, Philosophen etc. und mit allen besprochenen Musikwerken, hauptsächlich italienischen Opern. Diese Datenbank dient als Grundlage für die derzeit in Arbeit befindlichen Stellenkommentare. Zum eigenen Erstaunen geht die Zahl der von Heinese behandelten Musiker und Kompositionen in die Hunderte. Zahlreiche Opern, die Heinese ausführlich bespricht, liegen aber nicht im Druck vor. Er selbst besaß Abschriften oder hatte Zugang zu zeitgenössischen Musikaliensammlungen. Für die Stellenkommentare werden alle von Heinese behandelten Musikwerke in zeitgenössischen



Abb. 3: Die letzte Seite des dritten Teils des Erstdrucks von Wilhelm Heinese Musikroman *Hildegard von Hohenthal*, Berlin 1795.

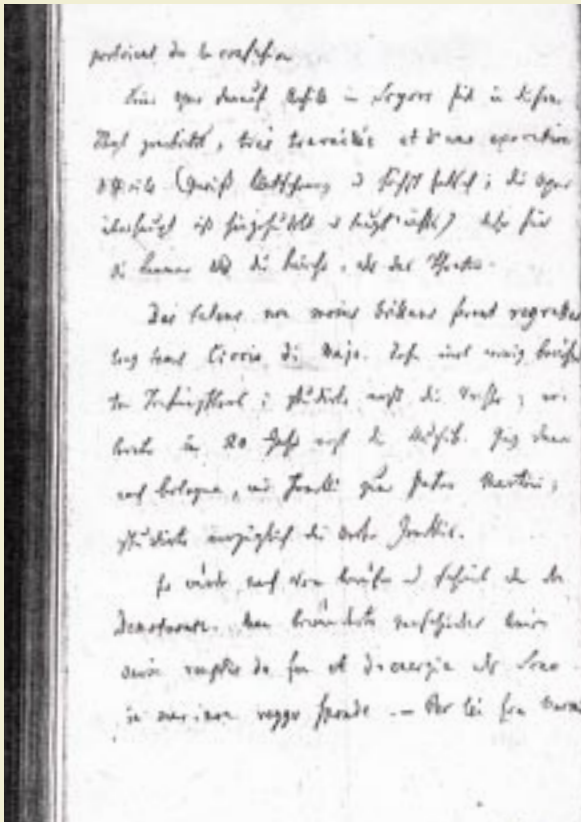


Abb. 4: Wilhelm Heinse, Nachlaßheft 9, Blatt 173v. (Mit freundlicher Genehmigung der Stadt- und Universitätsbibliothek Frankfurt.)

Drucken oder Handschriften autopsiert, was ausgedehnte Arbeiten in auswärtigen Bibliotheken zur Folge hat.

Abbildung 2 zeigt das Titelblatt des Erstdrucks der *Hildegard*. Links ein Stich von Pythagoras am Monochord. Er soll als erster die physikalisch-akustischen Grundlagen der Musiktheorie (Proportionen der Intervalle) gelehrt haben. In pythagoräischer Tradition behandelt auch Heines Musikroman u.a. den Aufbau von Intervallen, Akkorden, Tonarten und Fragen der musikalischen Temperatur. Die Titelvignette rechts zeigt ein weibliches Ohr; die weiteren Bände der *Hildegard* bilden noch ein männliches Ohr ab, je einen weiblichen und männlichen Kehlkopf und schließlich, am Schluß des Bandes, das Innenohr (Abbildung 3), vergrößert und in Originalgröße. Diese anatomischen Abbildungen stammen von Soemmerring, den Heinse in seinem Roman auch als medizinische Autorität zitiert. Die Abbildungen von Ohr und Kehlkopf symbolisieren die moderne Auffassung von Musik: Während Pythagoras mit dem Verstand die mathematisch-physikalischen Grundlagen der Musik untersucht, wendet sich der Opernliebhaber Heinse mit seinen *Sinnen* der Musik zu. Das Gehör hält er für den vornehmsten *Sinn*, die Gesangkunst der italienischen Oper für den Gipfel menschlicher Musikübung.

### Schriften aus dem Nachlaß

Alle die Musik betreffenden Notizen aus dem handschriftlichen Nachlaß wurden vom Autor 1997/98 in Frankfurt in jeweils mehrwöchigen Aufenthalten übertragen. Sie enthalten zu großen

Teilen dieselben musiktheoretischen Ausführungen wie die *Hildegard*: Tatsächlich hat Heinse seine beiden Romane *Ardinghello* und *Hildegard von Hohenthal* mittels einiger hundert wörtlicher oder nur leicht veränderter Übertragungen aus seinen Notizheften zusammengesetzt. Die Nachlaßaufzeichnungen sind allerdings reichhaltiger und in einzelnen Angaben genauer. Von besonderem Interesse sind jene Passagen, die bislang noch nicht ediert worden sind. Es handelt sich hierbei meist um Exzerpte aus musik- und kunsttheoretischen Schriften der damaligen Zeit. Oft hat Heinse jedoch die Quellenangabe ausgelassen. Abbildung 4 zeigt eine Seite aus einem sechsseitigen Exzerpt, das bislang noch nicht ediert worden ist (Blatt 173v aus Heft 9). Am verkürzten Sprachstil und den eingestreuten Passagen in französischer Sprache ist das Exzerpt als solches erkennbar; hier handelt es sich, wie schließlich herausgefunden wurde, um Jean Claude Richard Saint-Non, *Voyage pittoresque ou description des royaumes de Naples et de Sicilie*, Bd. 1, Paris 1781, S. 162ff. Inhaltlich geht es um die Musikschulen in Neapel, aus denen der von Heinse hochgeschätzte Opernkomponist Jomelli hervorgegangen ist. Der erste Absatz lautet:

„Seine Oper darauf *Achill in Scyros* ist in diesem Styl gearbeitet, *très travaillée et d'une execution difficile* (gewiß Klatscherey und höchst falsch; die Oper überhaupt ist hingehudelt und taugt nichts) mehr für die Kammer und die Kirche als das Theater.“

Aufschlußreich ist hierbei, daß Heinse die lobende Beurteilung einer Oper (*„très travaillée“*) durch seinen Gewährsmann sogleich zurückweist (*„Klatscherey“*): Heinse kannte diese Oper nämlich gut, an anderer Stelle seines Nachlasses (Heft 4, Blatt 46r) hat er sie selbst untersucht. Für die Musikforschung sind Heines Aufzeichnungen gerade wegen dieser Mischung aus eigener Kenntnis der Werke und kritischer Rezeption damaliger „Fachbücher“ besonders wertvoll. Die umfangreichste Auseinandersetzung führte Heinse mit dem französischen Philosophen und Komponisten Rousseau. Er beginnt (ebenfalls in Heft 9) Artikel für Artikel aus dessen *Dictionnaire de Musique* von 1768 zu exzerpieren und ihn dabei (heftig) zu kritisieren. Er kommt von „A“ wie „Accompagnement“ bis „C“ wie „Chronometre“ und bricht dann ab. Von den insgesamt 25 kommentierten Artikeln haben Schüddekopf und Leitzmann 19 ediert – die neue Ausgabe bringt sie alle vollständig.

### Erscheinen des Bandes

Nachdem der Textkorpus der *Hildegard*, der *Musikalischen Dialogen* und der Aufzeichnungen aus dem handschriftlichen Nachlaß inzwischen als druckreife Vorlage erstellt ist, werden jetzt ein Personenglossar und ein Stellenkommentar zu den *Musikalischen Dialogen* und den Nachlaßnotizen erarbeitet.

Das druckfertige Manuskript mit etwa 750 Druckseiten soll in einem Jahr fertiggestellt sein. Der Band wird Ende 1999 im Georg Olms-Verlag, Hildesheim erscheinen.

(Das Projekt wird gemeinsam mit den Wissenschaftlichen Hilfskräften Dr. Oliver Huck und Bettina Petersen bearbeitet.)

# „Zeig mir, wie du sprichst, und ich sag dir, wer du bist“

## Zum Verhältnis von Sprachgebrauch und Identität in mehrsprachigen Gemeinschaften

Wir erkennen unsere Mitmenschen an der Art, wie sie sprechen; wir ordnen sie bestimmten Gruppen zu und nehmen aufgrund eines bestimmten Akzentes eine entsprechende geographische oder soziale Herkunft an. In der zweisprachigen Region Galicien im Nordwesten Spaniens ist vor allem der Grad der Mischung der zwei in Kontakt stehenden Sprachen Spanisch und Galicisch für die Einordnung der Individuen im sozialen Raum relevant. In Zusammenarbeit mit der Paderborner Partneruniversität in Santiago de Compostela wurde untersucht, wie die „sprachliche Identität“ ermittelt werden kann.

In gewisser Hinsicht ist jede menschliche Gemeinschaft mehr oder weniger von sprachlicher Vielfalt geprägt, die nicht etwa funktionslos ist, sondern dazu dient, uns und unsere Mitmenschen im sozialen Raum einzuordnen. Dabei ist die Sprache, viel mehr noch als etwa Kleidung, Lebensstil oder politische Meinung, grundbedeutend für die Identifikation, weil die gesamte Erfassung der Welt für den Menschen an Sprache gebunden ist und die Sozialisation in erheblichem Umfang über Sprache vermittelt wird. Die eigene Sprache kann man nicht einfach auswechseln wie ein Kleidungsstück, denn zumindest ein Teil unserer Sprechgewohnheiten bleibt das ganze Leben lang von der Sprache der Kindheit geprägt.

In Gebieten mit expliziter Mehrsprachigkeit ist die Identifikationsfunktion der Sprache oft besonders auffällig. In Spanien etwa ist dies insbesondere in jenen Gebieten der Fall, in denen außer der Gemeinsprache Spanisch (bzw. Kastilisch) noch eine weitere, regionale Sprache gesprochen wird. Nachdem die Regionalsprachen während der franquistischen Diktatur unterdrückt und sogar zum Teil verboten waren, sind seit dem Ende der siebziger Jahre in Katalonien, dem Baskenland und Galicien neben der Staatssprache auch die jeweils lokalen Sprachen offiziell anerkannt worden. Das heißt, daß Katalanisch, Baskisch und Galicisch in den entsprechenden Regionen Einzug ins Schulwesen, die Universitäten, die Parlamente und die Medien gefunden haben.

### Fallstudie:

#### Zweisprachigkeit in Galicien

Im Nordwesten der Iberischen Halbinsel wird traditionell Galicisch gesprochen, eine mit dem Spanischen (und noch mehr mit dem Portugiesischen) engverwandte Regionalsprache, die im Mittelalter eine gewisse Bedeutung als Schriftsprache hatte, dann aber im Bereich der Hochsprache vom Kastilischen verdrängt wurde und als gesprochenen Dialekt weiterlebte. Seit dem 19. Jahrhundert gab es verschiedene Versuche der Wiederbelebung



**Dr. Johannes Kabatek**  
ist Wissenschaftlicher  
Assistent im Fach Romanistik  
des Fachbereichs  
3/Sprach- und Literaturwissenschaften.

der galicischen Schriftsprache; die Forderung nach offizieller Anerkennung, die 1936 kurz vor dem Spanischen Bürgerkrieg durchgesetzt worden war, kam jedoch durch den politischen Einschnitt der Diktatur nie zum Tragen. Erst die demokratische Verfassung Spaniens von 1978 öffnete den Weg zu einer Offizialisierung der Regionalsprachen. In Galicien, wo die große Mehrheit der Bevölkerung Galicisch spricht (mehr als zwei Drittel), ergaben sich dadurch mehrere Probleme: Einerseits mußte die Regionalsprache plötzlich in Bereichen gesprochen werden, wo sie keinerlei Tradition hatte. Auch für jemanden, der zu Hause üblicherweise Galicisch spricht, bedeutet es eine Anstrengung, auf Galicisch eine Parlamentsrede zu halten oder in den Fernsehnachrichten auf einmal Galicisch sprechen zu müssen, denn in diesen Bereichen war zuvor ausschließlich Spanisch gesprochen worden. Zudem sind gerade die Sprecher der höheren Schichten zuweilen schon seit mehreren Generationen spanischsprachig, und gerade aus diesen Schichten stammen oft die Radiosprecher, Politiker, Lehrer und Professoren. Kein Wunder also, daß das „neue“ Galicisch, wie es in der Öffentlichkeit gesprochen wurde, zunächst einmal vor allem dadurch auffiel, daß es stark vom spanischen Einfluß geprägt war.

### The planner proposes, but the community disposes

Die Offizialisierung des Galicischen wurde mit verschiedenen Mitteln moderner Sprachplanung vorangetrieben: Galicische Linguisten erarbeiteten eine Standardnorm für die Schriftsprache, veröffentlichten Wörterbücher, Grammatiken und Anweisungen zum guten Gebrauch, die vor allem das Ziel verfolgten, das Galicische als Sprache zu vereinheitlichen und gleichzeitig, im Zuge eines gewissen Purismus, die unzähligen Kastilianismen aus der Sprache zu verbannen, die im jahrhundertelangen Kontakt in die galicische Umgangssprache gelangt waren.



Sprachplaner sind in den Institutionen, im Parlament, in den Medien und in den Gemeinden tätig. Aber Sprache läßt sich nicht von oben verordnen: die Planer können nur gewisse Richtlinien geben und Vorschläge machen. Welche Sprachformen sich dann tatsächlich auf Dauer in der neuen galicischen Hochsprache durchsetzen, dafür sind letztlich die Sprecher selbst verantwortlich, wie der norwegische Sprachforscher Einar Haugen formulierte: *The planner proposes, but the community disposes*. Aber diese *Community* ist in Galicien keinesfalls homogen, denn unter denjenigen, die heutzutage in der Öffentlichkeit Galicisch sprechen, gibt es solche, die galicischsprachig aufgewachsen sind, spanischsprachig Aufgewachsene und eine dritte Gruppe, die zwar Spanisch zur Muttersprache hat, jedoch durch Präsenz des Galicischen in der Familie zumindest über passive Galicischkenntnisse verfügt.

Um zu erfahren, welche sprachlichen Kurationsprozesse in Galicien derzeit bei der Schaffung der neugalicischen Hochsprache ablaufen, wurde an der Universität Paderborn in Zusammenarbeit mit dem Institut für Galicische Sprache in Santiago de Compostela untersucht, welche unterschiedlichen Eigenschaften die Sprache der verschiedenen Sprechergruppen charakterisieren und ob es Tendenzen der sprachlichen Orientierung einzelner Gruppen an anderen gibt. Das Interesse der Sprachwissenschaftler in Galicien lag dabei vorrangig auf der Frage der Meßbarkeit des Erfolgs von Sprachplanung, während es für die Paderborner Seite in erster Linie um einen interessanten Beispielfall sprachlicher Dynamik ging, an dem man die Prozesse sprachlicher Identifikation von Individuen in einer mehrsprachigen Gesellschaft untersuchen konnte.

**Der „sprachliche Fingerabdruck“**

Der erste Schritt bestand in der Auswahl einer möglichst heterogenen Gruppe von Informanten, deren Galicisch untersucht werden sollte. Von den Informanten wurden verschiedene Sprachproben aufgenommen und ausgewertet. Um eine objektive Vergleichsbasis für die Aussprache zu bekommen, mußten sie erstens jeweils vier Texte vorlesen. Zweitens wurden mit ihnen in verschiedenen formalen Situationen längere, auf Tonband festgehaltene Gespräche über unterschiedliche Themen geführt. Die Untersuchung der Aussprache konzentrierte sich nach einer Reihe von Tests auf einen Bereich, wo besonders deutliche Ausspracheunterschiede zwischen Spanisch und Galicisch festgestellt wurden: die Realisierung der Vokale. Es wurden einige Vokale in gleicher Position bei verschiedenen Sprechern isoliert und in bezug auf Länge, relative Tonhöhe und Intensität mit einem Programm zur computerunterstützten Sprechanalyse (Kay CSL 4,0) untersucht. Schon aufgrund der Analyse weniger Vokale ließen sich die Sprecher in zwei Gruppen einteilen. Damit war sozusagen ihr „Akzent“ objektiv gemessen worden, mit einem recht eindeutigen Ergebnis, denn die Daten korrelierten weitgehend mit der jeweiligen Sprecherbiographie. Die Sprecher mit spanischsprachigem Hintergrund sprachen Galicisch mit einem anderen Akzent als die Sprecher galicischsprachiger Prägung. Was subjektiv als Höreindruck wahrnehmbar war, konnte so objektiv bestätigt werden.

Der zweite Schritt bestand in der Transkription und Analyse der Interviews in bezug auf Morphologie, Satzbau und Wortschatz, wobei sich zeigte, daß die Sprecher sich untereinander durch die

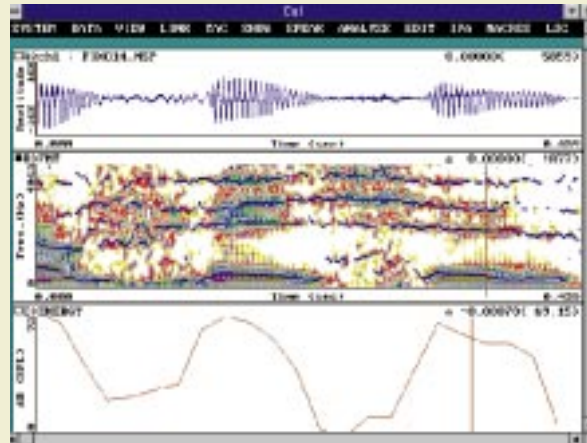


Abb. 1: Das galicische Wort *fixo* (mit Artikel, d.h. *o fixo* [o fijo]); gesprochen von einer Sprecherin mit „spanischem Akzent“: mit stark betontem, gelängtem Schlußvokal in optischer Darstellung durch Kay CSL (Computerized Speech Analysis). Im oberen Fenster sieht man die Amplitude der gemessenen Schallphänomene: mit breiten, regelmäßigen Wellen bei den Vokalen (hier *o-i-o*) und diffussem Geräusch bei den Konsonanten *f* und *j*. Im mittleren Fenster die Darstellung der Formanten, d.h. der die Vokalqualität bestimmenden Resonanzfrequenzen, die durch die dunklen Stellen sichtbar sind (in der Bildschirmdarstellung durch Linien verstärkt). Das untere Fenster zeigt den Mittelwert der meßbaren Lautstärke, erlaubt also u.a. die Messung der Vokalbetonung. Weitere Messungen betrafen die Grundfrequenz der Vokale (hier nicht dargestellt) zur Bestimmung des Intonationsverlaufs.

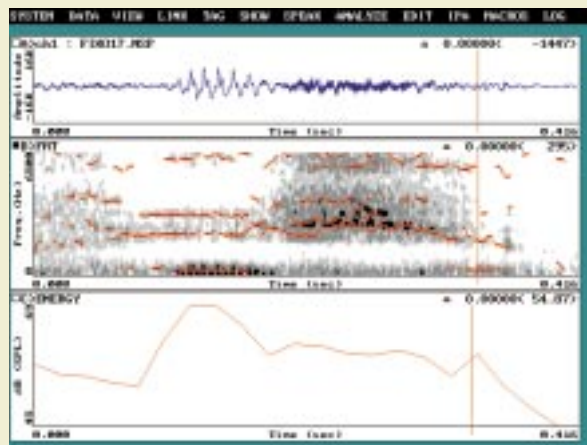


Abb. 2: Das galicische Wort *fixo*; gesprochen von einem Sprecher mit galicischer Muttersprache: mit deutlich hervorgehobenem, langem Tonvokal und kurzem, kaum hörbarem Schlußvokal.

verschieden große Anzahl sprachlicher Interferenzen der Nachbarsprache (d.h. spanischer Elemente im Galicischen oder umgekehrt) unterschieden. Inhalt eines Teils der Interviews waren jeweils die Meinungen und Einstellungen der Sprecher zur Sprachensituation in Galicien, ihre Bewertung bestimmter Formen und die Frage der Zuordnung einiger syntaktischer und lexikalischer Beispiele zu einer der Kontaktsprachen. Die Kombination aller dieser Faktoren – spektrographisch untersuchte Aussprache, Analyse der Interferenzen, Sprecherbiographie und sprachliche „Attitüden“ – erlaubte die Zuordnung der Sprecher zu bestimmten Gruppen und sogar die Bestimmung einer Art „sprachlichen Fingerabdrucks“ eines jeden Sprechers.

**„Negative“ Interferenz**

Ein (auch in sprachtheoretischer Hinsicht) zentraler Aspekt für die Untersuchung war die Beobachtung sogenannter „negativer“ Interferenz, d.h. der *Nichtrealisierung* sprachlicher Ausdrücke zur Vermeidung von Interferenz: Zweisprachige Sprecher engverwandter Sprachen zeigen teilweise Unsicherheiten in der Zuordnung von Elementen zur einen oder anderen Sprache. Wenn sie nicht sicher sind, ob ein Ausdruck nicht vielleicht der anderen Sprache angehört, versuchen sie, diesen eher zu vermeiden. Dies läßt sich natürlich nur schwer messen, kann aber z.B. an Selbstkorrekturen der Sprecher, an deren Selbstbeobachtung oder an der auffälligen Häufung von Formen beobachtet werden, die statt der vermiedenen Formen verwendet werden.

**Ergebnisse**

Für die Konsolidierung der galicischen Hochsprache ergab die Untersuchung das Ergebnis, daß sich eindeutige Tendenzen in bezug auf die derzeitige Sprachentwicklung feststellen lassen. Auffälligerweise sind die führenden Gruppen – diejenigen, an denen sich auch Sprecher anderer Gruppen orientieren – zum einen die der spanischsprachig aufgewachsenen urbanen Sprecher, die nach einem bewußten Sprachenwechsel nun im Alltag vorrangig Galicisch sprechen, und zum anderen die der galicischsprachig aufgewachsenen Sprecher, die beim Sprechen bewußt auf die Vermeidung von Kastilianismen und dialektalen Elementen achten. Abgelehnt wird sowohl das stark kastilisch beeinflusste, von vielen als „künstlich“ bewertete Galicisch der „professionellen“ Sprecher, die nur bei der Arbeit (etwa im Fernsehen) Galicisch sprechen (wohingegen sie im Alltag spanisch sprechen); als auch stark dialektal markiertes Galicisch, wie in dem grob vereinfachten Schema in Abbildung 3.

In sprachtheoretischer Hinsicht zeigte sich, daß aus der Untersuchung der sprachlichen Eigenheiten eines Individuums einerseits sehr genaue Hinweise auf dessen sprachliche Sozialisierung entnommen werden können (v.a. bei der apparativen Untersuchung bestimmter lautlicher Merkmale) und daß sich andererseits durch die getrennte Untersuchung der sprachlichen Strukturierungsebenen (Phonetik, Morphologie, Syntax, Wortschatz) im Hinblick auf *positive* und *negative* sprachliche Interferenz herausstellt, welcher Sprechergruppe die Personen gegenwärtig angehören oder angehören *wollen*. Das heißt, daß man objektiv zeigen kann, wie die verschiedenen Individuen von ihrer sprachlichen Herkunft geprägt sind, wie sie in der Gegenwart versuchen, durch eine bestimmte Sprechweise diese entweder zu

verbergen oder aber zu unterstreichen, und an welchen Individuen oder Gruppen sie sich dabei orientieren.

**Literatur**

Monteagudo, Henrique u. Antón Santamarina (1993): „Galician and Castilian in contact: historical, social and linguistic aspects“, in: Trends in Romance Linguistics and Philology, Vol. 5: Bilingualism and Linguistic Conflict in Romance, hrsg. v. Rebecca Posner und John N. Green, Berlin/New York: Mouton de Gruyter, S. 117-173.

Kabatek, Johannes (1996): Die Sprecher als Linguisten. Interferenz- und Sprachwandelphänomene dargestellt am Galicischen der Gegenwart, Tübingen: Niemeyer.

Kabatek, Johannes (1997): „Strengthening identity: differentiation and change in contemporary Galician“, in: Jenny Cheshire u. Dieter Stein (Hrsg.): Taming the Vernacular. From Dialect to Written Standard Language, London/New York: Longman 1997, S. 185-199.

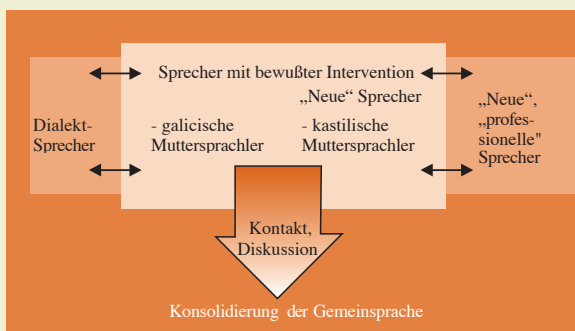


Abb. 3: Konsolidierung der galicischen Gemeinsprache (Kabatek 1996, 188).



# Paderborn droht im Müll zu versinken

*Wie kann die Stadt das wachsende Abfallaufkommen bewältigen?*

Das Herz wirtschaftlichen Handelns ist das Treffen von Entscheidungen, so lautet eine gängige Lehrmeinung der Wirtschaftswissenschaften. In modernen Industriegesellschaften wird die Fähigkeit, Entscheidungen im Team bzw. in Gruppen zu treffen, immer bedeutsamer. Die Lehr- und Forschungseinheit „Wirtschaftspädagogik“ arbeitet seit vielen Jahren an einem Lehr- und Lernprogramm, das als Entscheidungstraining angelegt ist. Im Rahmen des Entscheidungstrainingsprogramms wird versucht, mit Hilfe aktiver partizipativer Methoden wie z.B. Fallstudien, Rollenspielen, Planspielen und Szenarien den Schülerinnen und Schülern die Schlüsselqualifikation „Entscheidungsfähigkeit“ zu vermitteln.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat nunmehr der Universität Paderborn ein Forschungsvorhaben zugesprochen mit dem Ziel, in Klassen der kaufmännischen Berufsschulen zu untersuchen, wie Entscheidungsprozesse von Schülergruppen im Rahmen der Fallstudienarbeit ablaufen bzw. erfolgreich durchgeführt werden können (1). Die dazu notwendigen Feldforschungen wurden in zwei Klassen des Ausbildungsberufs „Steuerfachangestellte“ an der Ludwig-Erhard-Schule in Paderborn durchgeführt. Für die weitere Realisierung des Vorhabens wurde eine Fallstudie zu der Thematik „Urteil des Bundesverfassungsgerichts zur



**Prof. Dr. Franz-Josef Kaiser** hat an der Universität Paderborn seit 1975 die Professur für Wirtschaftspädagogik inne. Forschungsschwerpunkte sind u.a. Probleme der beruflichen Aus-, Fort- und Weiterbildung, Konstruktion und Entwicklung von Lehr-Lernarrangements, Modellversuchsforschung.

Verpackungssteuer vom 7.5.1998 und Konsequenzen für die Abfallbeseitigung in Paderborn“ entwickelt, die sich auf die aktuelle Problematik bezieht.

## „Urteil des Bundesverfassungsgerichts zur Verpackungssteuer“ als Ausgangssituation

Das Abfallproblem zählt heute zu den drängendsten kommunalpolitischen Herausforderungen. Trotz gestiegenen Umweltbewußtseins und entsprechender Maßnahmen zur Abfallverringering wächst die Abfallmenge weiter an (vgl. Altmann 1997). In



Abb. 1: Abfallentsorgung

Quelle: Bundesumweltministerium

Paderborn mußte 1996 eine Gesamtabfallmenge von 55 573 Tonnen beseitigt werden. Vor dem Hintergrund knapper werdenden Deponieraumes zeichnet sich allmählich ein entsprechender „Entsorgungsnotstand“ ab.

Die Begrenztheit des Deponieraumes und die Erkenntnis, daß der „beste“ Abfall derjenige ist, der gar nicht erst entsteht, haben in vielen Städten und Gemeinden eine Vielzahl von Initiativen zur Abfallvermeidung ausgelöst. Für die Gestaltung der Abfallbeseitigung können die kommunalen Gebietskörperschaften als Entsorgungsträger in der Regel die

Gebührengestaltung, die Abfallberatung, das kommunale Beschaffungswesen und die Auftragsvergabe sowie die Förderung von Maßnahmen zur Abfallvermeidung nutzen. Darüber hinaus können Aktionen nur dann stattfinden, wenn sich nach Bundesrecht eine Regelungslücke ergibt.

Der Stadt Kassel gelang es als erster Kommune, mit den Mitteln des Abgabenrechts eine kommunale Maßnahme zur Verringerung des Abfallaufkommens einzuführen. Ende 1991 wurde eine Satzung über die Erhebung einer kommunalen Verpackungssteuer erlassen, die am 1.7.1992 in Kraft trat (vgl. Konrad 1995, Landsberg 1994). Nach dieser Satzung wird eine Steuer auf nicht wiederverwendbare Verpackungen und nicht wiederverwendbares Geschirr erhoben, sofern Speisen und Getränke darin zum Verzehr an Ort und Stelle angeboten werden. Bis Juli 1997 hatten in der Bundesrepublik Deutschland über 47 Kommunen eine solche Verpackungssteuer erhoben.

Grundsätzlich ist mit der Bestätigung der Kasseler Satzung durch das Bundesverwaltungsgericht ein neuer Einstieg in die Abfallvermeidung vor Ort gegeben. Allerdings hat das Gericht mit seinem Urteil vom 7.5.1998 die kommunale Verpackungssteuer für „verfassungswidrig“ erklärt. Es macht jedoch für seine Begründung keine steuerrechtlichen Bedenken geltend. Vielmehr wird angeführt, daß die kommunale Verpackungssteuer als Lenkungssteuer der gegenwärtig praktizierten Umweltpolitik des Bundes widerspricht, in der das Kooperationsprinzip maßgeblich ist. Insofern ist mit dem Urteil nicht ausgeschlossen, daß bei einer veränderten Umweltpolitik des Bundes entsprechende Ökosteuern auf kommunaler Ebene erlassen werden können.

### Zur Gestaltung der Lernumgebung für den Unterricht

Ausgangspunkt für die Fallbearbeitung ist folgende Situationschilderung:

*In den letzten Jahren ist das Abfallaufkommen unserer Stadt weiter gewachsen, insbesondere durch die Verwendung von Einwegverpackungen. Es ist zu befürchten, daß sich diese Entwicklung in den nächsten Jahren weiter fortsetzt. Die Kapazität der örtlichen Mülldeponie reicht jedoch mittelfristig nicht mehr aus, um das Abfallaufkommen von Stadt und Landkreis Paderborn zu bewältigen. Eine Erweiterung der Deponie oder*



Abb. 2: Kompostierung auf der „Alten Schanze“.

Quelle: Stadtverwaltung Paderborn

*eine Erhöhung der Müllabfuhr-Gebühren sind sicherlich aufgrund zu erwartender Bürgerproteste politisch nicht einfach durchzusetzen. Wenn die Stadt Paderborn die Nutzung der Müllverbrennungsanlage in Bielefeld-Herford oder den Bau einer eigenen Müllverbrennungsanlage und die damit verbundenen hohen Kosten für die Stadt und die Bürger dauerhaft vermeiden will, ist eine Reduzierung des Abfallaufkommens unabdingbar. Aufgrund des Urteils des Bundesverfassungsgerichts ist zu diskutieren, welche Möglichkeiten die Stadt Paderborn hat, das Abfallproblem zu bewältigen.*

Im Verlauf der Fallstudienarbeit entwickeln die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen Lösungsvorschläge, diskutieren mehrere Entscheidungsalternativen systematisch hinsichtlich ihrer Vorteile, Nachteile und Konsequenzen und entscheiden sich in der Gruppe jeweils für eine Alternative.

Für die Gruppenarbeit werden entsprechende Informationsmaterialien in Form von Quellentexten, Schaubildern, Graphiken, Statistiken zum Müllaufkommen und zur Finanzsituation der Stadt, aktuelle Zeitungsartikel usw. zur Verfügung gestellt.

### Das Forschungsdesign

Für die Durchführung der Fallstudienarbeit erhalten die Schüler und Schülerinnen zusätzlich zu den Informationsmaterialien eine differenzierte Arbeitsanweisung, ein Arbeitsblatt, um die Lösungsvorschläge festzuhalten, und eine Entscheidungsmatrix, um Vorteile, Nachteile und Konsequenzen der ausgewählten Entscheidungsalternativen systematisch zu ermitteln (vgl. Kaiser/Kaminski 1997, 127 ff.). Ferner müssen sie ihre Entscheidungsfindung schriftlich begründen. Die Gruppengröße beträgt vier bis fünf Schülerinnen und Schüler.

Es ist das Ziel der Feldstudie, die eher explorativen Charakter trägt, den Entscheidungsprozeß in Kleingruppen unter zwei Kooperationsbedingungen zu untersuchen:

1. Der Entscheidungsprozeß wird durch den systematischen Einsatz einer **Entscheidungsmatrix** gestützt und angeleitet.
2. Jeweils ein Schüler moderiert den Diskussions- und Entscheidungsprozeß in den Kleingruppen.

Im Rahmen einer Interaktionsprozeßanalyse wird erforscht, welche Auswirkungen diese beiden Lenkungshilfen auf die Effek-

tivität der Entscheidungsfindung haben, d.h. inwiefern die genannten Maßnahmen dysfunktionale Aktivitäten hinsichtlich der Fallbearbeitung während der Kleingruppenarbeit verringern und die Qualität der Argumentation von Lernenden zur Begründung der Entscheidungsfindung fördern. Insofern wird untersucht, inwieweit eine komplexe Lernumgebung ein erhöhtes Ausmaß an geleitetem Problemlösen erforderlich macht, um den Lernprozeß zu unterstützen.

### Erste empirische Befunde zum Unterricht

Zur Vorbereitung des Forschungsvorhabens wurde ein Pretest durchgeführt, um den Fall im Unterricht zu erproben und für das Untersuchungsanliegen zu modifizieren. Dem Pretest, der vor dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts durchgeführt wurde, lag die Fallstudie „Einführung einer Verpackungssteuer in Paderborn?“ zugrunde. Der Pretest wurde in einer Steuerklasse am 26.5.1997 in der Mittelstufe (zweites Ausbildungsjahr) in der Kaufmännischen Schule des Landkreises Diepholz in Niedersachsen durchgeführt. Es haben 11 Auszubildende im Alter von 19 bis 25 Jahren teilgenommen, die Schülerinnen und Schüler hatten entweder Realschulabschluß oder Abitur.

Alle drei Kleingruppen entschieden sich, in Paderborn keine Verpackungssteuer einzuführen, stattdessen wurden jeweils die folgenden Maßnahmen zur Fallbewältigung vorgeschlagen:

- Gruppe 1: Subventionierung von umweltfreundlich agierenden Betrieben in Form von Steuerermäßigungen (z.B. Senkung der Gewerbesteuer)
- Gruppe 2: Verwendung biologisch verwertbarer Verpackungen
- Gruppe 3: Mitbenutzung anderer Deponien und Müllverbrennungsanlagen

Die Auswertung der schriftlichen Begründungen zu der jeweils getroffenen Entscheidung macht deutlich, daß in allen Gruppen die Entscheidungsfindung nicht auf der Grundlage einer systematischen Diskussion erfolgte. In den Begründungen wurden die Vorteile, Nachteile und Konsequenzen der getroffenen Entscheidung meist nicht methodisch gezielt gegenüber anderen Alternativen thematisiert oder abgewogen. Die in den einzelnen Kleingruppen getroffenen Entscheidungen belegen, daß im Hinblick auf eine systematische Entscheidungsfindung die Gruppenergebnisse Defizite aufweisen.

Insgesamt ergibt sich, daß die in den Kleingruppen getroffenen Entscheidungen nicht gegen die Verpackungssteuer, sondern gegen die - als zu gering angesehene - Wirksamkeit der Verpackungssteuer als geeigneter Maßnahme zur Verminderung des Einweg-Verpackungs-Aufkommens getroffen wurden. In der Nachbesprechung wurde deutlich, daß häufig auch persönlich motivierte Begründungen für die Gruppenentscheidung mit ausschlaggebend waren. Eine Schülerin äußerte beispielsweise: „Azubis sind prinzipiell nicht in der Lage, höhere Preise zu bezahlen.“

Entsprechende Unterrichtsversuche mit Kleingruppen, die die Fallstudienarbeit mit Hilfe einer einfachen Arbeitsaufgabe und ohne Unterstützung durch eine Entscheidungsmatrix durchgeführt haben, verweisen darauf, daß der Einsatz einer differenzierten Arbeitsanweisung und einer Matrix notwendige Bedingungen sind, um die Fallstudienarbeit systematisch anzuleiten. Gruppen ohne entsprechende Anleitung diskutieren in der Regel auf einer schmaleren methodischen Basis und mit geringerer inhaltlicher

Tiefe, schweifen eher von der Aufgabenstellung ab. Stattdessen erzählen sich die Teilnehmer Begebenheiten aus dem privaten Erfahrungsbereich, die nur in geringem Maße zur Aufgabenstellung gehören, und finden erst nach längerer Zeit zum Thema zurück. Dementsprechend wird die gefundene Entscheidung mitunter mehrmals verändert, weil immer wieder inhaltliche Gesichtspunkte auftauchen, die bisher übersehen und nicht diskutiert worden sind.

Allerdings zeigt das Ergebnis, daß auch in den Gruppen, die die Fallstudienarbeit mit Hilfe einer differenzierten Arbeitsanweisung und einer Entscheidungsmatrix durchgeführt haben, die Entscheidungsfindung nicht hinreichend systematisch durchgeführt wurde. Die Anweisungen wurden im Hinblick auf die Entwicklung von Lösungsvorschlägen, Diskussion von Entscheidungsalternativen, Entscheidungsfindung zwar der Reihe nach „abgearbeitet“. Gleichwohl wies der Entscheidungsprozeß in den Schülerkleingruppen hinsichtlich einer systematischen Entscheidungsfindung auch hier Defizite auf:

- Lösungsvorschläge wurden häufig schon zu Beginn diskutiert, so daß später nur noch wenig Zeit für die systematische Behandlung der Entscheidungsalternativen zur Verfügung stand.
- Von den vier Entscheidungsalternativen wurden in allen drei Schülergruppen jeweils nur drei Alternativen systematisch hinsichtlich ihrer Vorteile, Nachteile und Konsequenzen bearbeitet.
- Für die Entscheidungsfindung wurden die Entscheidungsalternativen hinsichtlich der Vorteile, Nachteile und Konsequenzen nicht systematisch und differenziert miteinander verglichen.
- Die Begründung der Entscheidungsfindung erfolgte relativ einseitig, indem z.B. ein ausgewählter Aspekt besonders betont wurde; demgegenüber wurden andere wichtige Aspekte zu wenig berücksichtigt.
- Ferner zeigte sich, daß zum Abschluß der Fallstudienarbeit in der Disputationsphase die getroffene Entscheidung nicht differenziert und angemessen gegenüber Einwänden anderer Gruppen verteidigt werden konnte.

### Vorläufiges Zwischenergebnis der Untersuchung

Eine differenzierte Arbeitsanweisung und die Unterstützung der Fallstudienarbeit durch eine Entscheidungsmatrix erweisen sich als unabdingbar. Gleichwohl sind sie keine hinreichenden Bedingungen, damit der Entscheidungsprozeß in Schülerkleingruppen systematisch durchgeführt wird und die Entscheidungsfindung sich effektiv gestaltet.

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens werden diese ersten Ergebnisse durch Vergleichsstudien einer differenzierten Analyse unterzogen.

Der Interaktionsprozeß in den Kleingruppen wird dahingehend analysiert, in welcher Weise Interaktionen auf der Inhalts-, Lenkungs- und sozio-emotionalen Ebene die Diskussion und den Entscheidungsfindungsprozeß beeinflussen.

Der Entscheidungsprozeß wird daraufhin untersucht, welche Effekte auftreten, wenn ein Schüler den Entscheidungsprozeß in der Kleingruppe moderiert.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung bezieht sich auf die Fragestellung, welche Rolle der Lehrer einnehmen und welche Maßnahmen er treffen muß, damit die Lernenden den Entschei-

dungsprozeß in Gruppen weitgehend selbst erfolgreich steuern.

#### Literatur

Altmann, J. (1997): Umweltpolitik. Daten-Fakten-Konzepte für die Praxis, Stuttgart.

Beck, K.; Heid, H. (Hg.) (1996): Lehr-Lern-Prozesse in der kaufmännischen Erstausbildung. Wissenserwerb, Motivierungsgeschehen und Handlungskompetenzen (Beiheft 13 der Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik), Stuttgart.

Kaiser, F.-J. (1976): Entscheidungstraining. Die Methoden der Entscheidungsfindung. 2. Auflage, Bad Heilbrunn.

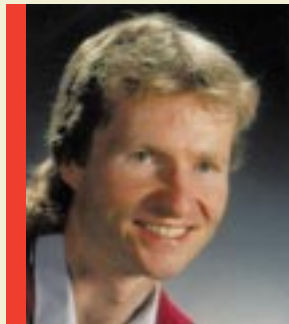
Kaiser, F.-J.; Siggemeier, M.; Brettschneider, V.; Flottmann, H.;

Schröder, R. (1995): Umweltbildung an kaufmännischen Schulen. Theoretische Grundlagen, Probleme und Realisierungsmöglichkeiten, Bad Heilbrunn.

Kaiser, F.-J.; Kaminski, H. (1997): Methodik des Ökonomie-Unterrichts (unter Mitarbeit von V. Brettschneider u. M. Hübner). Grundlagen eines handlungsorientierten Lernkonzepts mit Beispielen, 2. Auflage Bad Heilbrunn.

Konrad, K. (1995): Verfassungsfragen kommunaler Verpackungssteuersatzungen, in: Betriebs-Berater, H. 22, S. 1109 ff.

Landsberg, G. (1994): Abfallvermeidung durch kommunale Verpackungssteuer, in: Stadt und Gemeinde, H. 11.



#### Dr. Volker Brettschneider

ist seit 1990 wissenschaftlicher Angestellter an der Universität Paderborn im Rahmen der Lehr- und Forschungseinheit Wirtschaftspädagogik. Forschungsschwerpunkte sind u.a. Umweltbildung, Gestaltung von Lernumgebungen, Entscheidungsprozesse in Kleingruppen.

(1) Das Forschungsprojekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (Aktenzeichen: KA 430/4-1).



# Optoelektronik im blauen Spektralbereich

## *Halbleiterlaser für blaues Licht soll Kapazität von Datenspeichern erhöhen*

Die Verbindung von Optik und Elektronik – mit dem Kunstwort „Optoelektronik“ bezeichnet – hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Optoelektronische Anzeigen informieren den Menschen über den Zustand von komplizierten Geräten, und Informationen werden mittels optoelektronischer Systeme übertragen und gespeichert.

### Mikroelektronik und Optoelektronik

Die Mikroelektronik ist aus dem modernen Leben nicht mehr wegzudenken. Mikroelektronische Schaltungen steuern im Haushalt Waschmaschinen und Stereoanlagen, sorgen für die richtige und umweltfreundliche Dosierung des Treibstoffs in Kraftfahrzeugen und ermöglichen Telefonate von unterwegs. Moderne Computer haben aufgrund der hochintegrierten elektronischen Schaltungen Rechenleistungen, wie sie vor wenigen Jahren nur die Großrechenanlagen in Forschungszentren hatten. Der Mensch selbst steht mit den elektronischen Schaltungen meist über Tastaturen und optische Anzeigen in Verbindung. Erst durch die Information über den Zustand eines komplexen elektronischen Gerätes, über die Anzeige von gewünschten Daten oder Graphiken auf einem Bildschirm wird der Benutzer in die Lage versetzt, die Vorteile der Elektronik vollständig zu nutzen. Die Bedeutung, die der Verbindung von Optik und Elektronik zukommt, wurde schon vor vielen Jahren erkannt – und die

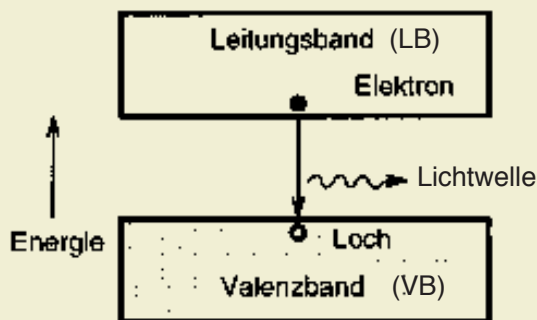


Abb. 1: Die Abbildung zeigt schematisch, wie Licht in einem optoelektronischen Halbleiterbauelement entsteht. Elektronen, die aus dem energetisch tieferliegenden „Valenzband“, z.B. durch ein elektrisches Feld, in das „Leitungsband“ angehoben werden, hinterlassen im Valenzband einen unbesetzten Zustand, ein „Loch“. Die angeregten Elektronen sind instabil; nach kurzer Zeit fallen sie in das Valenzband zurück, d.h. sie rekombinieren mit dem Loch unter Aussendung von Licht.



**Prof. Dr. Klaus Lischka**

ist seit 1994 Professor für Experimentalphysik im Fachbereich 6/Physik der Universität Paderborn und Leiter der Arbeitsgruppe „Physik und Technologie optoelektronischer Halbleiter“.

Optoelektronik entstand als ein eigenständiges Fachgebiet. Inzwischen ist der Bereich der Optoelektronik nicht mehr nur auf Anzeigen und Bildschirme beschränkt, sondern umfaßt auch den Bereich der Telekommunikation sowie den Bereich der Datenspeicherung, wo große Mengen von Informationen mittels optoelektronischer Systeme übertragen und gespeichert werden. Als Beispiel für ein optoelektronisches Speichermedium sei hier der hinlänglich bekannte Compact-Disk-(CD)-Spieler erwähnt.

### Wie entsteht Licht?

Der Grundbaustein der Elektronik ist das Element Silizium, welches in einkristalliner Form die Basis für Milliarden von elektronischen Schaltungen für die verschiedensten Aufgabenbereiche bildet. In der Optoelektronik hingegen werden sehr viele unterschiedliche Materialien, meist Halbleiter, eingesetzt. Der Grund dafür ist in den physikalischen Prozessen, die zur Entstehung von Licht führen, zu suchen; Elektronen der Atomhülle, die aufgrund von zugeführter äußerer Energie, z.B. durch eine Flamme, in einen angeregten Zustand versetzt werden, können die zugeführte Energie in Form von Licht wieder abgeben, wenn sie in ihren Grundzustand zurückkehren. Man kann diesen Effekt sehr schön beobachten, wenn man Kochsalzkörnchen in eine Gasflamme wirft. Die Flamme wird gelb, da Kochsalz das Element Natrium enthält. Andere Elemente geben eine andere Färbung: So färben Salze, die Kupfer enthalten, die Flamme grün.

Ähnliche Prozesse führen zur Erzeugung von Licht in optoelektronischen Halbleiterbauelementen, den sogenannten lichtemittierenden Dioden, kurz LED genannt. Hier werden natürlich die Elektronen nicht durch eine Flamme, sondern durch das elektrische Feld, das z.B. mit einer Batterie erzeugt wird, angeregt. Den Elektronenzuständen in Atomen entsprechen im Halbleiterkri-



Abb. 2: Dioden, die blaues Licht emittieren, werden schon heute industriell gefertigt und eingesetzt, hier z.B. in einer quadratmetergroßen Anzeigetafel für Werbezwecke.

stall die „Energiebänder“, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Werden die Elektronen in das höchstgelegene Band, das sogenannte Leitungsband angehoben, so hinterlassen sie im tiefergelegenen Valenzband einen unbesetzten Zustand, in der Physik auch „Loch“ genannt. Unter Aussendung von Licht können sie mit dem Loch rekombinieren. Je nach der Größe der „Energie-lücke“ zwischen Valenz- und Leitungsband wird Licht mit unterschiedlicher Energie und damit unterschiedlicher Farbe emittiert. Welche Farbe dies nun ist, hängt von der chemischen Zusammensetzung des Halbleiterkristalls ab. Halbleiter mit kleiner Energielücke (z.B. Galliumarsenid, GaAs) emittieren infrarotes Licht, welches für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. LEDs aus diesem Halbleiter werden u.a. in der Fernbedienung von Fernsehgeräten und Stereoanlagen eingesetzt, um mit unsichtbaren Lichtimpulsen die entsprechenden Befehle zu übertragen. Halbleiter mit einer etwas größeren Energielücke können zur Erzeugung von sichtbarem Licht verwendet werden. So werden aus einer Mischung der Elemente Gallium, Aluminium, Phosphor und Arsen Einkristalle hergestellt, die rotes, gelbes und sogar grünes Licht emittieren. Sie bilden das Grundmaterial für jene winzigen Lichtquellen, die in verschiedenster Form in optischen Anzeigen verwendet werden. Aber auch als „Lampen“ werden diese optoelektronischen Bauelemente bereits eingesetzt, z.B. bei Zusatzbremsleuchten in Pkws. Im Gegensatz zu konventionellen Glühlampen wird bei der Erzeugung von Licht in opto-

elektronischen Bauelementen praktisch die gesamte elektrische Energie in Licht umgewandelt, was sehr sparsam ist und die Bauelemente schont, da sich diese praktisch nicht erwärmen.

Rot, gelb, grün: was aber ist mit blauem Licht? Mancher Leser wird sich bereits gefragt haben, warum bisher keine lichtemittierenden Dioden für blaues Licht erwähnt wurden. Dies liegt sicherlich nicht daran, daß es keine Halbleiter mit einer entsprechend großen Energielücke gibt (blaues Licht hat die größte Energie im Spektrum des Regenbogens). Entsprechende Verbindungshalbleiter sind seit vielen Jahren bekannt. Es liegt vielmehr an den für den Einsatz der Halbleiterkristalle in einem optoelektronischen Bauelement notwendigen Voraussetzungen, daß diese Halbleiter den elektrischen Strom leiten können. Bei Halbleitern, die in der Optoelektronik eingesetzt werden, erreicht man dies genauso wie bei Silizium dadurch, daß Fremdatome, sogenannte Dotier-elemente, in das Kristallgitter eingebaut werden. Diese Dotieratome geben Elektronen aus ihrer Hülle leicht an den Kristall ab und die so freigesetzten Elektronen können dann zur Stromleitung beitragen. Unglücklicherweise steigen aber die Schwierigkeiten, einen Halbleiter mit bestimmter elektrischer Leitfähigkeit herzustellen, mit der Größe seiner Energielücke. Erst vor wenigen Jahren ist es gelungen, halbleitende Verbindungen für den blauen Spektralbereich mit entsprechender Leitfähigkeit herzustellen. Diese Halbleiter bestehen aus Elementen der II. und VI. Gruppe des Periodensystems (z.B. einer Verbindung aus Zink und Selen, ZnSe) oder aus bestimmten Elementen der III. und V. Gruppe des Periodensystems (z.B. Galliumnitrid, GaN). Dioden, die blaues Licht emittieren, werden bereits industriell gefertigt und eingesetzt, z.B. in quadratmetergroßen Anzeigetafeln für Werbezwecke (Abbildung 2).

### Optoelektronische Halbleiter

Optoelektronische Bauelemente haben, genauso wie die Bauelemente der modernen Mikroelektronik, extrem kleine Abmessungen, die meistens in Mikrometer (das ist der millionste Teil eines Meters) angegeben werden. Würde man versuchen, die Halbleiterkristalle, aus denen die Bauelemente hergestellt werden, mit jener Größe zu fertigen, die für die Bauelemente benötigt wird, so hätten diese Kristalle eine Dicke, die kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares ist. Ihre mechanische Haltbarkeit wäre äußerst begrenzt, und es wäre praktisch unmöglich, sie in einem Produktionsprozeß zu handhaben. Es ist daher in der modernen Halbleitertechnologie üblich, die Bauelemente auf der Oberfläche von etwa einem halben Millimeter dicken einkristallinen Scheiben, den sogenannten wafern, unterzubringen. In der Elektronik bestehen diese wafer aus Silizium, der größte Teil ihres Volumens ist ungenutzt und dient ausschließlich als mechanischer Träger für die elektronischen Schaltungen. Die Verhältnisse lassen sich mit dem Beispiel vergleichen, daß in einem Gebäude, das Hunderte von Stockwerken hoch ist, nur das oberste zu Wohnzwecken verwendet würde und der Rest ungenutzt bliebe.

Beim Grundmaterial der Elektronik, dem Silizium, kann man sich diese „Verschwendung“ leisten, da dieses Element „wie Sand am Meer“ vorhanden ist (Quarzsand besteht aus Silizium und Sauerstoff). Die Elemente, aus denen die Halbleiterkristalle mit optoelektronischer Bedeutung zusammengesetzt sind, kommen wesentlich seltener vor, und ihre chemische Aufbereitung ist viel

aufwendiger als die von Quarzsand zu Silizium. Dies ist der Grund, warum halbleitende Kristalle, die in der Optoelektronik eingesetzt werden, in Form von dünnen Schichten auf relativ billige, einkristalline Wafer aufgebracht werden. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden mehrere Verfahren entwickelt, mit denen hochwertige Halbleiterschichten und auch Schichtsysteme aus unterschiedlichen Halbleitern auf einkristallinen Substraten hergestellt werden können. Eines dieser Verfahren ist die sogenannte Molekularstrahlepitaxie (Epitaxie: gleichförmiges Wachstum). Bei diesem Verfahren werden die Elemente, aus denen der herzustellende Kristall besteht, in geheizten Tiegeln (Quellen) verdampft und die entstehenden Dampfstrahlen auf das Substrat gerichtet. Dort können sich diese Elemente anlagern und formen, sofern die entsprechenden Parameter, wie der Fluß der Elemente auf die Oberfläche und die Temperatur der Substratoberfläche, richtig eingestellt sind, eine einkristalline Schicht. Um den Einbau von Verunreinigungen, aber auch die Behinderung der geradlinigen Flugbahn der Teilchen zwischen Quelle und Substrat durch Luftmoleküle zu verhindern, wird der gesamte Wachstumsvorgang unter Ultrahochvakuumbedingungen durchgeführt. Die Quellen sowie das Substrat und alle Einrichtungen zur Beobachtung und Messung des Wachstumsvorgangs befinden sich in einer Kammer aus rostfreiem Stahl, die mit Hilfe von Hochleistungspumpen evakuiert wird, so daß ein Vakuum entsteht, welches dem im Weltraum gleicht.

### Halbleiterlaser für blaues Licht

In der Arbeitsgruppe „Physik und Technologie optoelektronischer Halbleiter“ am Fachbereich Physik der Universität Paderborn werden Halbleiterschichtsysteme, die für optoelektronische Anwendungen relevant sind, mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt. Eine der Ultrahochvakuumkammern, in der dies geschieht, ist in Abbildung 3 gezeigt. Das Interesse der Forscher

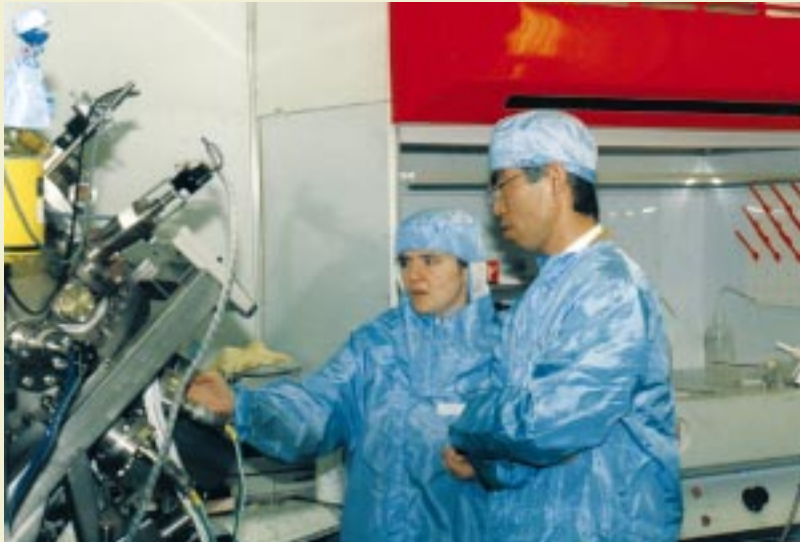


Abb. 3: Bild einer Ultrahochvakuumanlage für die Molekularstrahlepitaxie von Halbleitern mit großer Energielücke. Die Anlage befindet sich in einem Reinraumlabor der Arbeitsgruppe „Physik und Technologie optoelektronischer Halbleiter“ an der Universität Paderborn. Das Bild wurde bei einem Besuch von Prof. K. Ohkawa (rechts), einem Pionier der Molekularstrahlepitaxie von Halbleitern für optoelektronische Anwendungen, aufgenommen. Prof. Ohkawa unterhält sich hier mit Dipl.-Phys. Brigitte Buda, die im Rahmen ihrer Dissertation neue Halbleiterschichtsysteme mit optoelektronischen Anwendungen mittels Molekularstrahlepitaxie herstellt.

liegt dabei vor allem in der Klärung von grundlegenden Fragen der Wachstumsprozesse selbst, der Kontrolle der Wachstumsparameter mit Hilfe von Meßmethoden, die während des Wachstumsvorgangs eingesetzt werden können (insitu-Methoden), sowie der Optimierung der Schichtstrukturen in bezug auf künftige optoelektronische Bauelemente. Die Halbleiter, die hergestellt werden, sind Verbindungen von Zink, Selen und Schwefel (II-VI-Halbleiter) und Nitride der Gruppe III-Elemente Gallium und Indium. Alle diese Halbleiter haben eine große Energielücke zwischen dem Leitungs- und Valenzband und sind für die Herstellung von blau-emittierenden optoelektronischen Bauelementen geeignet. Im besonderen ist man in Paderborn an der Realisierung von Halbleiterlaserstrukturen interessiert.

Im Gegensatz zur lichtemittierenden Diode sind Halbleiterlaser relativ kompliziert aufgebaute Bauelemente, die für spezielle Anwendungen benötigt werden. In der lichtemittierenden Diode geben die angeregten Elektronen im Leitungsband ihre Energie in zufälligen, „spontan“ ablaufenden Prozessen ab – dies geschieht ähnlich zufällig wie das Herabfallen der Blätter von den Bäumen im Herbst. Die Lichtwellen, die bei den einzelnen Prozessen entstehen, stehen in keiner Beziehung zueinander und haben auch nicht exakt die gleiche Frequenz. Außerdem werden sie gleichmäßig verteilt in alle Raumrichtungen emittiert (Abbildung 4a).

Beim Laser hingegen wird die Abgabe der Energie der Elektronen im Leitungsband in Form von Lichtwellen durch eine andere Lichtwelle, die auf das angeregte Elektron trifft, hervorgerufen. Man nennt diesen Prozeß auch „stimulierte“ Emission. In einem Vergleich kann man sich das Verhalten der angeregten Elektronen vorstellen wie das von Dominosteinen, die in einer Reihe aufgestellt werden. Wird der erste Stein angestoßen (dies entspricht der Emission von Licht), fällt er auf den zweiten und wirft diesen um, der wiederum den dritten usw. Das Umfallen des ersten Steines löst also eine Reihe von weiteren Prozessen

aus, die mit dem ersten in einer bestimmten Beziehung stehen. Vorausgesetzt wird natürlich, daß die Wirkung des ersten „Umfalls“ den zweiten Stein erreichen kann, daß also die Dominosteine nahe genug beieinander aufgestellt sind. Im Halbleiterlaser passiert ähnliches; trifft eine Lichtwelle, die von einem Elektron ausgesendet wird, auf ein weiteres Elektron mit exakt der gleichen Anregungsenergie, so wird dieses zur Abgabe seiner Energie in Form einer Lichtwelle stimuliert. Die so entstandene Lichtwelle kann nun weitere Rekombinationsprozesse anregen. Wesentlich ist dabei, daß die auf diese Weise entstehenden Lichtwellen in einer räumlichen und zeitlichen Beziehung zueinander stehen und ihre Frequenzen (Farben) praktisch gleich sind. Sperrt man nun mit Hilfe von Spiegeln, die einen großen Teil der Lichtintensität in den Halbleiterkristall zurückreflektieren, die Wellen in diesem ein, so wird, vorausgesetzt es sind genügend angereg-

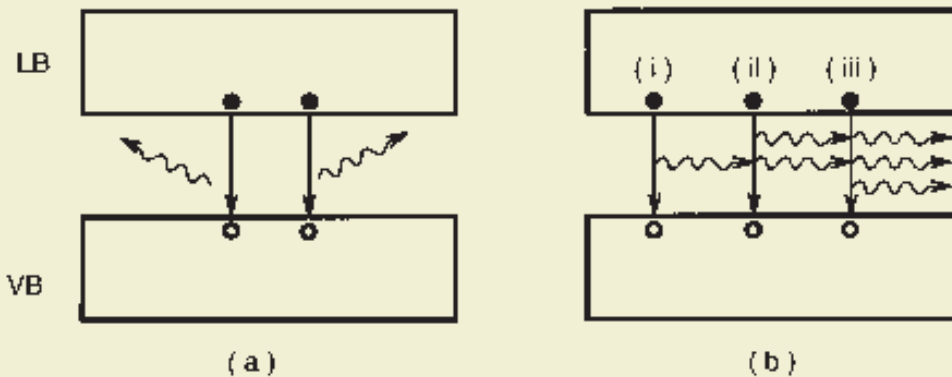


Abb. 4: a) Bei der „spontanen“ (zufälligen) Rekombination von Elektronen und Löchern stehen die Lichtwellen, die bei den einzelnen Prozessen entstehen, in keiner physikalischen Beziehung zueinander.  
 b) Bei der „stimulierten“ Emission von Licht wird der Rekombinationsprozess durch eine Lichtwelle, die selbst wieder von einem angeregten Elektron stammt, hervorgerufen. Die so entstandenen Lichtwellen (ii) stimulieren weitere Übergänge (iii) usw. Es kommt zu einer Verstärkung des Lichtes durch stimulierte Emission von Strahlung (Laser).

te Elektronen mit gleicher Anregungsenergie vorhanden, der oben beschriebene Prozess ständig wiederholt. Es kommt zu einer Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung (englisch: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = LASER) (Abbildung 4b). Ein Teil der Lichtstrahlung kann durch einen teildurchlässigen Spiegel aus dem Halbleiterkristall ausgekoppelt werden.

Laserlicht hat eine große Intensität, ist monochromatisch (einfarbig) und stark gerichtet (gebündelt). Für Lichtquellen, die gebündeltes, monochromatisches Licht hoher Intensität ausstrahlen, gibt es eine Reihe von Anwendungen, vor allem wenn die Lichtquellen nicht viel größer als ein Sandkorn sind. Eine der wichtigsten Anwendungen ist jene beim Auslesen von Informationen in optischen Datenspeichern, allgemein bekannt als Kompakt Disk (CD und CD-ROM). Dabei werden die Daten als winzige reflektierende Punkte auf einer Scheibe gespeichert und können mit einem scharf gebündelten Lichtstrahl wieder ausgelesen werden. Derzeit verwendet man zum Auslesen der Informationen in CD-Spielen infrarotes Licht, das eine relativ große Wellenlänge hat. Allerdings kann man die einzelnen Datenpunkte beim Auslesen nur dann trennen, wenn ihre Ausdehnung größer ist als die der Lichtwellenlänge, die man zum Auslesen benutzt. Damit setzt die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts der Komprimierung der Daten eine natürliche Grenze. Das Bestreben, Datenspeicher mit immer größerer Kapazität herzustellen, treibt die Entwicklung von Halbleiterlasern voran, die Licht mit kleiner Wellenlänge (blaues oder ultraviolettes Licht) erzeugen können.

Seit Jahren laufen in einer Vielzahl von industriellen und universitären Forschungseinrichtungen Arbeiten mit dem Ziel, einen kommerziell einsetzbaren Halbleiterlaser für blaues Licht zu entwickeln. Die Paderborner Aktivitäten, an der Universität naturgemäß auf die Grundlagenforschung ausgerichtet, sind im internationalen Vergleich als relativ klein anzusehen. Dennoch ist es der Gruppe in Paderborn gelungen, im Rahmen von Projekten, die vor allem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der VW-Stiftung gefördert werden, international beachtete Erfolge zu erzielen; dies vor allem bei der Herstellung von Galliumnitridschichten mit kubischer Kristallstruktur. Dieses Material ist schwierig herzustellen, sollte aber, entspre-

chende elektrische und optische Eigenschaften vorausgesetzt, hervorragend als Ausgangsmaterial für die Produktion von Halbleiterlasern geeignet sein, die tiefblaues und ultraviolettes Licht emittieren. Die in den letzten Jahren in Paderborn erzielten Verbesserungen des Materials in bezug auf seine optischen und elektrischen Eigenschaften haben internationale Anerkennung gefunden. Erst kürzlich konnte in Untersuchungen, die in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin durchgeführt wurden, gezeigt werden, daß kubisches GaN aus Paderborn in bezug auf seine optischen Eigenschaften Weltspitze darstellt. Nun wird eifrig versucht, einfache Laserstrukturen herzustellen, um im Wettstreit mit großen Labors mitzumischen. Unterstützt werden die Paderborner Forscher dabei u.a. durch das Rektorat der Universität Paderborn, das die Aktivitäten im Forschungsschwerpunkt „Optoelektronik“ fördert, sowie auch durch ihr Vertrauen in die Geschichte von David und Goliath ...



# Bruchmechanik an Materialgrenzflächen

*Beispiel eines gelungenen Transfers von  
Grundlagenforschung in die industrielle Praxis*

Zu Beginn dieses Jahrzehnts schlossen sich zwei Ingenieurdisziplinen zusammen – die Technische Mechanik und die Werkstoffwissenschaft –, um gemeinsam an einem großen Ziel zu arbeiten, nämlich der Entwicklung robuster technischer Strukturen mit Hilfe von „smart materials“. Derzeit bahnt sich eine weitere Fusion an: Der bisherigen Union tritt die Elektrotechnik bei, um die mechanische Zuverlässigkeit mikroelektronischer Bauteile zu erhöhen.

Von industrieller Seite wird der Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse aus Grundlagenfächern wie der Physik, der Chemie oder auch der sogenannten „theoretischen“ Ingenieurwissenschaften häufig bemängelt. Die betriebene Forschung sei nicht „praxisgerecht“, allzu „theoretisch“ beziehungsweise überhaupt nicht „umsetzbar“, ja, Grundlagenforschung werde im Elfenbeinturm betrieben und sei, beschönigend gesagt, wirklichkeitsfremd. Die Grundlagenforscher versuchen, so gut es geht, diesen Vorurteilen entgegenzuhalten und argumentieren, daß wissenschaftliche Ergebnisse eine gewisse Zeit der Reifung brauchen, um verwertbar zu werden. Viele Beispiele werden ins Feld geführt, wie etwa die Formulierung der Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes durch Faraday und Maxwell um 1850 und deren großtechnische Umsetzung in den zahlreichen Erfindungen von Siemens oder Edison in den darauffolgenden Jahrzehnten.

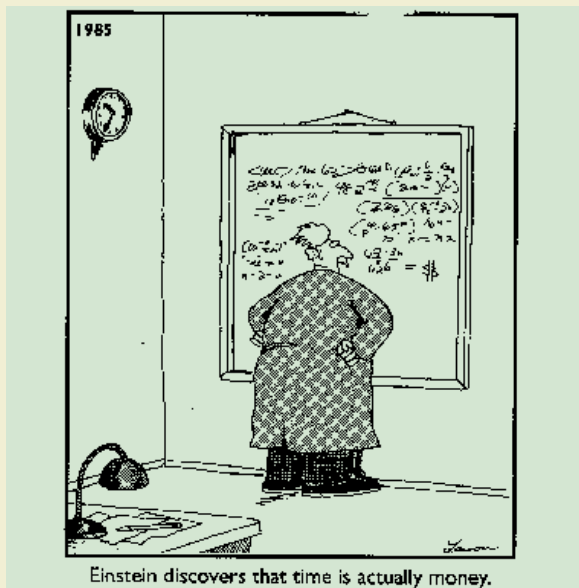


Abb. 1: Der ewige Streit zwischen Grundlagenforschung und Anwendung aus der Sicht von Gary Larson.



**Prof. Dr. rer. nat. Klaus Herrmann** ist seit 1977 Professor für Technische Mechanik im Fachbereich 10/Maschinentechnik an der Universität Paderborn. Arbeitsgebiete sind Festkörpermechanik, Kompositmechanik, Bruchmechanik, Werkstoffverhalten, kontinuumsmechanische Materialforschung.

## Grundlagenforschung als unerlässlicher Partner des technologischen Fortschritts

Die beste Antwort auf das Schreien der Böttier wurde jedoch wohl von dem Physiker Ludwig Boltzmann gegeben, der meinte, es gäbe nichts Praktischeres als eine gute Theorie. Mehr noch! Auch klassische Theorien, wie beispielsweise die seit langem etablierten Methoden der Technischen Mechanik, können dabei helfen, modernste technische Produkte zu verbessern. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Grenzflächenbruchmechanik, eine Ende der achtziger Jahre in Harvard und an der UC Santa Barbara vorangetriebene Symbiose von Konzepten der Mechanik mit materialwissenschaftlichen Methoden. Direkten Nutzen zogen hieraus zunächst einmal großtechnische Anwendungen, wie zum Beispiel Schweißnähte an Kesseln und Pipelines, deren Zuverlässigkeit und Restlebensdauer objektiv bewertbar wurden (Abbildung 2).



Abb. 2: Versagen entlang der Schweißnaht einer Erdgaspipeline von 8 cm Durchmesser.

**Thermo-mechanisches Versagen mikroelektronischer Bauteile**

In letzter Zeit jedoch hat sich ein neuer Anwendungsbereich der Grenzflächenbruchmechanik aufgetan, und zwar diesmal bei sehr kleinen Strukturen aus dem Bereich der Mikroelektronik. Diese bestehen aus einer Vielzahl von Materialien, deren unterschiedliches Verhalten in bezug auf mechanische und insbesondere thermische Belastung sich im Langzeitbetrieb als problematisch herausstellt.



Abb. 3: Muschelbruch eines gelöteten Mikrochips (links) sowie durch thermisch induzierte Lasten abgelöster Mikrochip (rechts).

So werden bei der Computer-Chip-Herstellung heute Halbleiterwerkstoffe eingesetzt, die bedingt durch die komplexen Herstellungs- bzw. Verarbeitungstechnologien (etwa das punktuelle Bonden im Herstellungsprozess oder aufgrund einer zyklischen thermischen Belastung während des Prüf- und Abnahmeprozesses) durch Initiierung thermischer Eigenspannungsrisse an den Kontaktelementen, an den Bauteilrändern und Grenzflächen sowie in den Lotanbindungen bis hin zum Versagen beansprucht werden (Abbildung 3). Solche Defekte führen sehr oft zu einem vollständigen Funktionsausfall. Infolge der unterschiedlichen thermoelastischen Materialkennwerte der Verbundpartner können sich in den betreffenden Bauteilkomponenten Eigenspannungsfelder aufbauen, welche die Stärke von durch mechanische Kräfteinwirkung entstandenen Spannungen wesentlich übertreffen können. Aufgrund der Sprödbrechneigung von Halbleitern und der Verbindung kommt es so zu unterkritischem Rißwachstum bzw. starken irreversiblen Verformungen und somit letztlich zu katastrophalen Versagensabläufen.

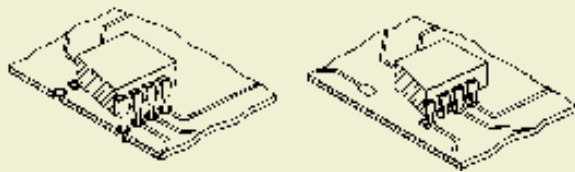
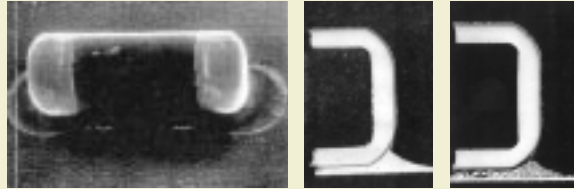


Abb. 4: Zum Prinzip der Pin-Through-Hole (links) und der Surface-Mount-Technology (rechts) nach [1].

**Bruch- und schädigungsmechanische Probleme bei der SMT-Technologie**

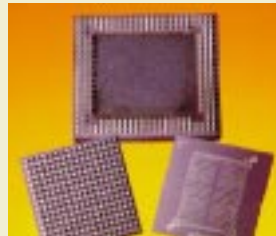
Ein ähnliches Schädigungsverhalten weisen Bauteile auf, die nach der sogenannten SMT-Technik (Surface Mount Technology) gefügt wurden. Im Gegensatz zu der älteren „Pin-Through-Hole“-Technologie werden bei dieser Methode elektronische Bauteile nicht per Steckkontakt durch die Platine hindurch elektrisch angebunden, sondern direkt über eine Lotanbindung auf die

Platine gesetzt (Abbildung 4). Ein Grund hierfür ist die Möglichkeit zur Verkleinerung der Leiterplatten durch beidseitige Bestückung bei sich gleichzeitig erhöhender Automatisierbarkeit des Bestückungsprozesses. In Abbildung 5 sind typische, per SMT gefügte Bauteilformen dargestellt, nämlich ein zweipoliger Miniaturwiderstand aus der MELE-Reihe, oben, sowie Chipträger, d.h. sogenannte Ball-Grid-Arrays (BGAs), unten.



Miniaturwiderstand unmittelbar nach Lötvorgang [2].

Lotanbindung im Anlieferungszustand und nach ca. 4 000 Temperaturwechseln [2].



BGA-Varianten



Schliffbild des Querschnittes von Lotkugeln eines BGAs [3]

Abb. 5: Zur Schädigungsproblematik von SMT-Bauteilen.

Weiterhin sind im Schnitt die Lotanbindungen zu sehen, z.B. im Falle des Zweipolers der Zustand des Lotfußes vor und nach ca. 4 000 Temperaturwechseln zwischen +125°C und -55°C. Zu erkennen ist ein Grenzflächenriß im Bereich der Lot/MELE-Kappenanbindung sowie eine Entmischung der beiden Komponenten des eutektischen Zinn-Blei-Lotes aufgrund irreversibler Deformation.

Ähnliches beobachtet man in den Schliffbildern durch die Lotkugeln einer Ball-Grid-Array-(BGA)-Struktur. Deutlich sichtbar sind Grenzflächenrisse zwischen Lotball und der Bauteil- bzw. der Platinenseite. Weiterhin sind innerhalb der in der Abbildung dargestellten Lotkugel Zonen unterschiedlicher Grautönung zu sehen. Wie im Fall des MELEs ist dies ein Anzeichen für die bei erhöhter Temperatur stattfindende und durch Spannungsgradienten noch verstärkte Trennung der Zinn-Bleikomponenten des eutektischen Lotes. Es versteht sich, daß sich aufgrund dieses Segregationsprozesses die Materialeigenschaften und mithin auch die Festigkeit der Lotanbindung verändern und letztendlich verschlechtern werden.

Die hier beschriebene Problematik ist der wesentliche Grund dafür, weshalb theoretische, numerische und experimentelle Untersuchungen zur Wärmespannungsrißentstehung und -ausbreitung in dreidimensionalen Mehrphasenverbunden in der Mikrosystemtechnik und der Materialforschung auf Grundlage der Kontinuums- und Grenzflächenbruchmechanik einen besonderen Stellenwert besitzen. Auf diesen Gebieten sind die Forschungsaktivitäten der Autoren und anderer Forscher am Laboratorium für Technische Mechanik (LTM) der Universität Paderborn seit langem angesiedelt.

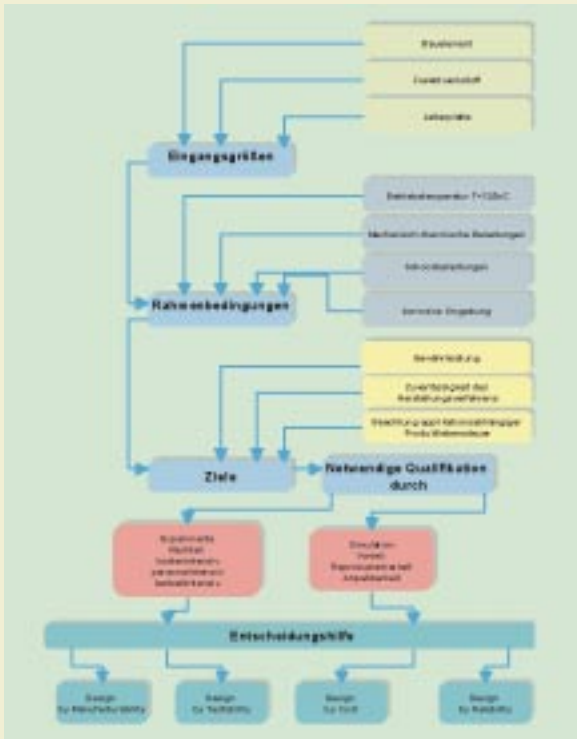


Abb. 6: Das Zusammenwirken von Theorie und Praxis bei der thermo-mechanischen Optimierung mikroelektronischer Bauteile.

**Die Ziele des Anwenders**

Seitens der bauteilherstellenden Industrie ist es aufgrund des Variantenreichtums, verbunden mit schneller Evolutionsfolge von Bauteilen, nur bedingt möglich, systematisch experimentelle und numerische Studien vorzunehmen. Zudem ist es schwierig, die prozeßbedingten Lastparameter am eigentlichen Produkt direkt zu verifizieren und die aufgrund unterschiedlicher Lieferqualitäten unvermeidlichen Schwankungen in den Materialparametern der Teilkomponenten schnell in den Designprozeß einzubinden. Mit dem Ziel, die Spannungsrißempfindlichkeit von Werkstoffverbunden zu minimieren, gilt es für die Hersteller, die aus der Fertigungs- und Belastungsvorgeschichte eingebrachten Eigenspannungs- bzw. Lastspannungszustände möglichst schnell abzuklären, um daraus eine Prozeßoptimierung für die Bauteilfertigung abzuleiten (Abbildung 6).

**Wissenschaftlich-technische Problemstellung**

Zuverlässigkeitsrelevante Merkmale von Bauelementen und Baugruppen sind stets in der Entwurfsphase einzubringen, um im späteren Produkt wirksam zu werden. Diese Designphase muß experimentell und analytisch abgesichert sein. Hierzu gibt es zur Zeit keine Alternativen.

Bei der Verifizierung der für die Prozeßoptimierung durchzuführenden numerischen und experimentellen Untersuchungen konnte auf dem am Laboratorium für Technische Mechanik sowie durch den Industriepartner Siemens AG in Berlin durchgeführten Versuchen und finiten Element-(FE-)Berechnungen

aufgebaut werden. Abbildung 7 zeigt stellvertretend für viele Rechnungen ein bei der Simulation des Verhaltens eines Zweipolers verwendetes FE-Netz.

Als erste Ansätze zur Bewertung der Lastspannungszustände und der daraus resultierenden Spannungsrißbildung wurden verschiedene Schädigungsmodelle ausgewertet, als simpelstes etwa ein nach den Materialwissenschaftlern Manson und Coffin benann-

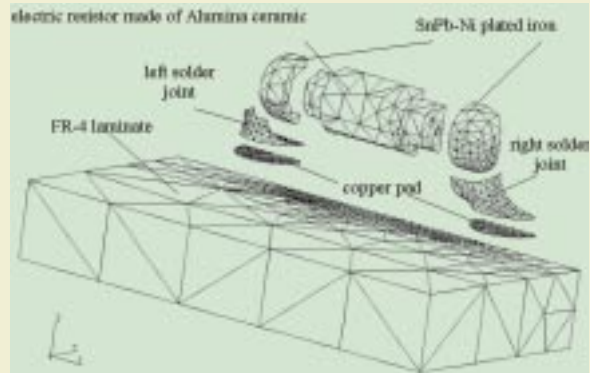


Abb. 7: FE-Simulation des Verhaltens eines Zweipolers [3].

tes empirisches Gesetz. Danach läßt sich die Anzahl  $N_f$  an Zyklen dadurch vorhersagen, daß man (etwa) per FE-Simulation den lokalen, maximalen Zuwachs an Kriechdehnung  $\Delta\epsilon_e^{cr}$  pro Temperaturzyklus ermittelt, der zum Entstehen einer lokalen Schädigung in der Lotanbindung notwendig ist (C und  $\gamma$  sind zwei den Lotwerkstoff kennzeichnende Materialparameter):

$$N_f = \left( \frac{\Delta\epsilon_e^{cr}}{C} \right)^{-\gamma}$$

Abbildung 8 zeigt den Zustand der plastischen und der Kriechdehnung in verschieden geformten, nach Schlifffbildern per FE modellierten Lotanbindungen von Zweipolern.

**Glanz und Elend des mathematischen Modells**

Die durch solche Rechnungen gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die experimentell bestimmten Stellen erster Schädigungsindikation (vgl. die Pfeile in Abbildung 8) fallen i.a. mit aus der FE-Rechnung ermittelten lokalen Spannungs-Dehnungsspitzen in der Lotanbindung zusammen. Bei der lebensdauertechnischen Bewertung derselben stellt die an Bimaterialgrenzflächen prinzipiell auftretende Spannungssingularität jedoch ein gewisses Problem dar. Hier kann man sich mit der Bestimmung der über ein charakteristisches Volumen gemittelten, singularitätsfrei dissipierten Energie weiterhelfen. Die physikalische Festlegung der Größe dieser Einflußzone ist jedoch nur unzureichend geklärt.
- Für die Lebensdauervorhersage des Lotanteils eines mikroelektronischen Bauteils ist es unerlässlich, den Spannungs-/Dehnungszustand innerhalb der Lotanbindung als Funktion des Temperaturzyklus zuverlässig zu kennen. Aufgrund der komplexen Geometrie des Bauteils und des nicht-linearen Materialverhaltens des Lotes (Kriechen, plastische Deformation) kann derselbe i.a. nur im Rahmen einer relativ zeitaufwen-



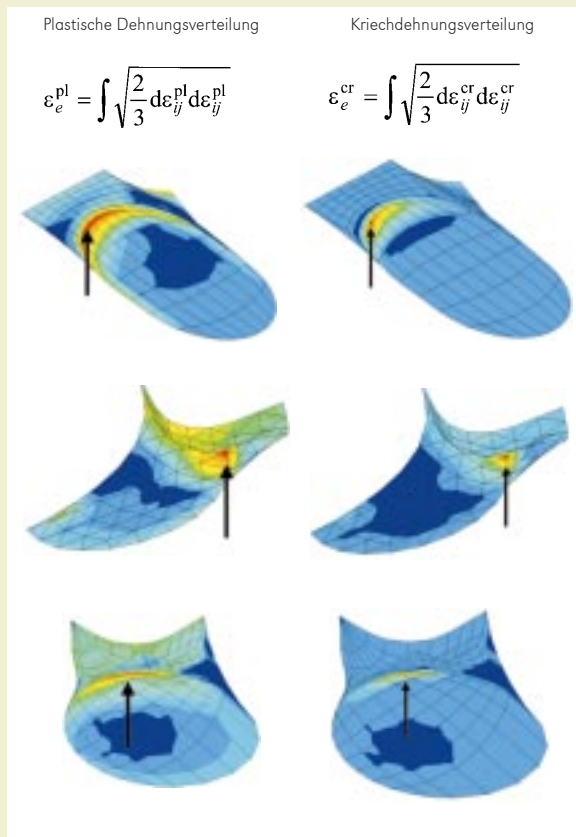


Abb. 8: FE-Simulation bei Zweipolern unter zyklischer thermischer Last; dargestellt sind numerisch berechnete, irreversible Dehnungsverteilungen bei geometrisch unterschiedlich geformten Lotanbindungen [3].

digen FE-Simulation ermittelt werden.

- Um zuverlässige Spannungs-/Dehnungsdaten aus der FE-Analyse zu erhalten, kommt es sehr auf eine sorgfältige Vernetzung und die Wahl der diskretisierenden Elemente an. In der Nähe von Bimaterialgrenzflächen bilden sich darüber hinaus Singularitäten in den Spannungen und Dehnungen, was einen erheblichen Einfluß auf die lokal bestimmten Dehnungen oder Energiedichten und damit auf die auf dieser Größe aufbauenden Lebensdauergleichungen hat.
- Aus einer FE-Rechnung lassen sich aufgrund lokaler Spannungs- und Dehnungsmaxima Orte hoher Schädigungswahrscheinlichkeit zuverlässig vorhersagen, das Eintreten einer Schädigung an diesem Ort darf jedoch nicht mit der Lebensdauer des gesamten Bauteils in Verbindung gebracht werden. Um letztere zuverlässig abzuschätzen, ist eine geeignete Mittelwertbildung von Spannungen/Dehnungen und dissipierten Energieanteilen über die gesamte Lotanbindung durchzuführen. Wie diese Mittelwertbildung genau vorgenommen werden muß und ob eventuell Bereiche hoher Spannungs-/Dehnungskonzentrationen entsprechend höher gewichtet werden müssen, kann nur im Vergleich mit experimentell bestimmten Lebensdauern für das gesamte Bauteil erarbeitet werden. Diesen aus Experiment und Theorie abgeleiteten Prozeß sorgfältig durchzuführen, ist auch im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauteilformen besonders wichtig.
- Eine dreidimensionale thermische sowie (daran gekoppelte)

Spannungs-/Dehnungsanalyse von Bauteilen unter Berücksichtigung nicht-linearen Materialverhaltens ist möglich, jedoch extrem zeitintensiv. Eine Zeitersparnis ist (a) durch Verwendung automatischer Netzgeneratoren sowie (b) durch Verwendung von Ersatzschaltungen/-modellen anstelle einer umfangreichen bauteilspezifischen FE-Diskretisierung denkbar. Kommerzielle automatische Netzgeneratoren führen jedoch meist zu aus Tetraedern bestehenden Diskretisierungen. Eine unkritische Verwendung eines so erstellten Netzes kann in der FE-Rechnung zur Erzeugung künstlicher Spannungsspitzen führen. Um solchen Effekten vorzubeugen, sind weitere relativ umfangreiche, grundsätzliche FE-Studien notwendig.

### Quantifizierung des Rißfortschritts

Die Bewertung rißtreibender Kräfte aus den per FE numerisch ermittelten Spannungs- und Verzerrungsfeldern erfolgt nach einem Vorschlag des Harvard-Professors Rice durch Auswertung eines Linienintegrals um die Rißspitze, genannt J-Integral:

$$J_k = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \oint_{\Gamma} b_{kj} n_j d\Gamma$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $b_{kj}$  den aus Spannungen und Dehnungen berechenbaren Energie-Impuls-Tensor nach Eshelby und  $n_j$  steht für den Normalenvektor der die Rißfront umfahrenden Kurve  $\Gamma$ .

Diese Gleichung bildet die Grundlage eines am LTM entwickelten Postprozessors zur bruchmechanischen Bewertung der Spannungs- und Verzerrungsfelder aus FE-Berechnungen in inhomogenen Verbundmodellen, der am Beispiel eines BGA verifiziert wurde. In einem ersten Schritt wurde dazu die betreffende Struktur relativ grob diskretisiert (Abbildung 9) und danach eine Temperatur- sowie darauf aufbauend eine Spannungs-/Dehnungsanalyse durchgeführt.

Dadurch läßt sich derjenige Lotball identifizieren, der besonders hohen Spannungs-/Dehnungsniveaus ausgesetzt ist. Im konkreten Fall eines mit einer konstanten Heizleistung arbeitenden Chips stellt sich beispielsweise heraus, daß der entlang der Diagonale eines BGAs an der Chipkante angrenzende Ball am höchsten belastet wird.

Dieser Lotball wird nun in einem sogenannten Submodell verfeinert diskretisiert (Abbildung 10), was auch das Einbringen neuer Strukturen, wie etwa von Grenzflächenrissen oder an der Grenz-

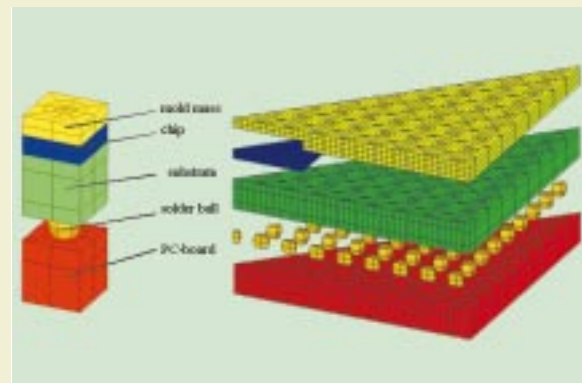


Abb. 9: Per Einheitszelle (links) grob diskretisierte BGA-Struktur (rechts) [4].



fläche gebildeten intermetallischen Phasen, erlaubt. Ein Endergebnis der Analyse, nämlich die rißtreibende Kraft als Funktion des Peripheriewinkels, ist in Abbildung 10 rechts zu sehen.

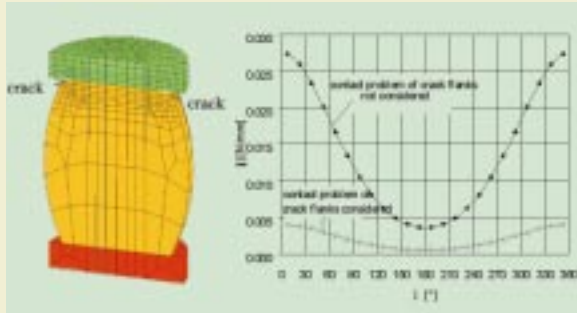


Abb. 10: Verfeinertes Submodell eines BGA-Lotballes mit Grenzflächenriß sowie rißtreibende Kraft als Funktion des Peripheriewinkels [4].

### Blick in die Zukunft

Neben der schwierigen Aufgabe der numerischen Berechnung des Spannungs-/Dehnungszustandes in geometrisch höchstgradig komplexen Bauteilen unter Einbeziehung nichtlinearen Materialverhaltens gilt ein besonderes Augenmerk der Autoren der Modellierung der zuvor erwähnten Segregation, also der bei erhöhter Temperatur stattfindenden und durch die Präsenz von Spannungsgradienten noch verstärkten Trennung der Zinn- und Bleiphasen des Lotes. Hier sind über mechanische Konzepte hinaus thermodynamische Überlegungen einzubringen, nämlich die mathematische Beschreibung von Diffusions- und Materialtransportvorgängen.

Ein weiteres Problem ist die Erfassung und Bestimmung der aufgrund des Alterungsprozesses sich zeitlich ändernden Materialparameter wie Steifigkeit oder Fließspannung etc. Aufgrund der geringen Größe der Bauteile ist es dazu nötig, geeignete Miniaturmeßverfahren zu entwickeln.

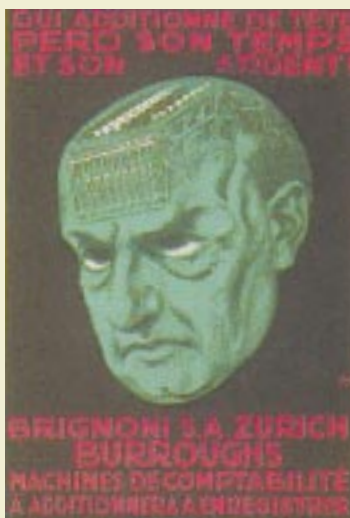


Abb. 11: Das Motto aller (numerischen) Simulanten: „Wer im Kopf addiert, verliert seine Zeit und sein Geld.“

In jedem Fall gilt jedoch die vor längerer Zeit von einem Hersteller mechanischer Rechenwerke getroffene und in der letzten Abbildung wiedergegebene Feststellung.

### Literatur

- [1] Seraphim, D. P., Principles of Electronic Packaging, McGraw-Hill, Inc., New York NY, 1989.
- [2] Jendry, J., Müller, W.H., Albrecht, H.-J., Strength and Lifetime Analysis of SMT Solder Joints: An Exemplary Study of the MiniMelf Component, Proc. Surface Mount International Conference, San Jose, 1997, pp. 626-636.
- [3] Albrecht, H.-J., Gamalski, J.: Fatigue Properties of BGA Solder Joints: A Comparison of Thermal and Power Cycle Tests, Proc. SMI '96, San Jose, 1996, pp. 61-80.
- [4] Herrmann, K.P., Dong M., Hauck T., Modelling of Thermal Cracking in Elastic and Elastoplastic Two-Phase Solids, J. of Thermal Stresses 20, 1997, pp. 853-904.



### PD Dr. rer. nat. Wolfgang

**H. Müller** war Hochschuldozent an der Universität Paderborn und ist seit März 1998 als Reader in Mechanical Engineering an der Heriot-Watt University in Edinburgh tätig. Sein Forschungsinteresse gilt zahlreichen Anwendungen und Spezialgebieten der Mechanik und betrifft insbesondere die kontinuumstheoretische Simulation des Verhaltens komplexer technischer Strukturen mit nichtlinearem Werkstoffverhalten.

# Mit Radiotracer-Methoden auf den Spuren von Rüstungsaltslasten

*Radioaktive Isotope ermöglichen die Verfolgung des TNT-Abbaus*

Abbaureaktionen und Metabolisierungen sind heute die Domäne der Radiotracer-Methoden, in denen radioaktiv markierte Substanzen als Sensor dienen, um den Weg oder das Schicksal einer chemischen Verbindung z.B. in der Umwelt oder auch im Organismus zu verfolgen. Im Fachbereich Chemie und Chemietechnik werden diese Techniken z.B. verwendet, um den Abbau des Sprengstoffs TNT bis zur vollständigen Mineralisierung zu untersuchen.

Unter Rüstungsaltslasten versteht man definitionsgemäß ehemalige chemische Rüstungsbetriebe, die der Herstellung und Verarbeitung von militärischen Sprengstoffen, Kampfstoffen und Treibladungspulvern sowie deren Vorprodukten dienen. Das Gefährdungspotential an diesen Standorten liegt in der Verunreinigung der Böden durch chemische Verbindungen, von denen das 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) eine dominierende Stellung einnimmt.

## **TNT, Sprengstoff und Altlast**

TNT ist ein sehr handhabungssicherer, stoßunempfindlicher Explosivstoff, der sich leicht vergießen läßt und durch Initialsprengstoffe zu heftiger Detonation gebracht werden kann. Durch seine vergleichsweise unproblematische Handhabung war und ist TNT der bedeutendste Sprengstoff, sowohl für militärische als auch für gewerbliche Zwecke. Erstmals synthetisiert

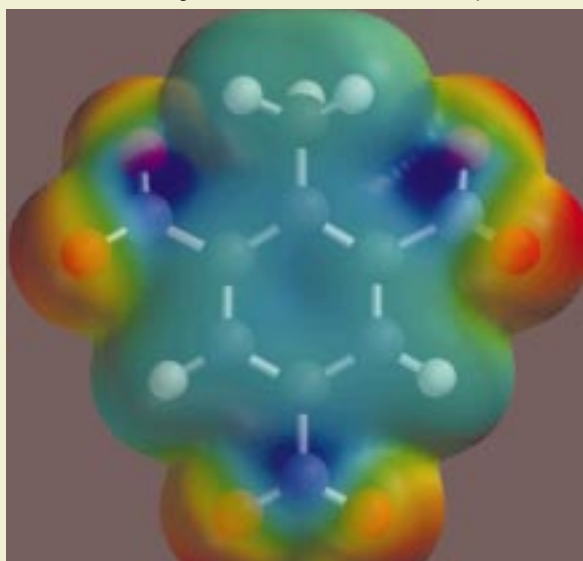


Abb.1: TNT-Molekül als Ball-and-Stick-Modell mit elektrostatischer Oberfläche.



**Prof. Dr. rer. nat. Gregor Fels** ist seit 1993 Inhaber der Professur für Organische Chemie im Fachbereich 13/Chemie und Chemietechnik an der Universität Paderborn.

wurde TNT 1863 von dem deutschen Chemiker Wilbrand, aber seine Eignung als Sprengstoff wurde erst 28 Jahre später erkannt, so daß eine Herstellung in großtechnischem Maßstab dann Anfang des 20. Jahrhunderts aufgenommen wurde.

Während des Zweiten Weltkrieges gab es im Deutschen Reich fünfzehn Werke für die Herstellung von TNT sowie zahlreiche Füllstellen und Munitionsanstalten, in denen TNT aufgrund seiner leichten Schmelz- und Gießbarkeit in Granaten, Bomben und Torpedos gefüllt wurde. Die Produktionsstätten wurden zum Teil erst ab 1938, d.h. unter Kriegsbedingungen, gebaut und nahmen häufig bereits vor Fertigstellung der Anlagen für die Abwasser- und Abfallbehandlung die Sprengstoffproduktion auf [1]. Noch heute finden sich Bodenbelastungen im Umkreis der ehemaligen Produktionsanlagen sowie der weiterverarbeitenden Betriebe. Bekannte Beispiele sind die ehemaligen Werke in Clausthal-Zellerfeld/Tanne, Elsnig, Hessisch Lichtenau/Hirschhagen und Stadtallendorf. Nach neueren Angaben des Bundesumweltamtes gibt es allein in Deutschland 3 240 Flächen, auf denen Rüstungsaltslasten vermutet werden. Davon macht TNT einen erheblichen Anteil aus. Hinzu kommt, daß an diesen Stellen auch noch eine Reihe von Metaboliten des TNT (insgesamt über 50 aromatische Verbindungen) gefunden werden, die als Zwischenstufen des biotischen (biologischen) und abiotischen (chemischen) Abbaus auftreten. Die Lokalisierung, Analyse und Dekontamination dieser Rüstungsaltslast stellt heute weltweit eine chemische, analytische und technologische Herausforderung dar. Einen großen Beitrag zur Entdeckung dieser Verbindungen in Böden und Gewässern hat die rasante Entwicklung der chromatographischen Analyseverfahren in den letzten 10 bis 15 Jahren geleistet, durch die man heute in der Lage ist, selbst noch Konzentrationen von z.B. 10 ng TNT/l nachzuweisen, was z.B. einer Verdünnung von etwa 1 kg dieses Sprengstoffes im Starnberger See entspricht.

**Reinigung  
TNT-belasteter Gewässer**

Trotz vieler Bemühungen, vor allem seit den achtziger Jahren, gibt es bis heute noch kein allgemein anerkanntes Verfahren, mit dem verunreinigte Böden von solchen Rüstungsaltslasten befreit werden können. Das hat zur Folge, daß die umgebenden Gewässer (Grund- und Oberflächenwässer) der ehemaligen Produktionsstätten einer ständigen Kontamination unterliegen, da Regenwasser die schwer löslichen Verbindungen langsam, aber stetig aus dem Boden ins Grundwasser auswäscht. Als vorübergehende Sofortmaßnahme können TNT und seine Zwischenverbindungen (Metabolite) durch Adsorption an Aktivkohlefiltern aus dem Wasser entfernt werden. Jedoch sind solche Adsorptionsverfahren weder unproblematisch, noch stellen sie eine Dauerlösung dar, so daß nach anderen Dekontaminationsverfahren für die aquatischen Pfade gesucht wird. Hier unterscheidet man zwischen biologischen [2] und chemischen [3] Verfahren. Während bei den biologischen Dekontaminationen die langsame Abbaugeschwindigkeit ein Problem darstellt, besteht bei chemischen Verfahren die Schwierigkeit, daß nur Reagenzien verwendet werden dürfen, die ihrerseits keine neue Verunreinigung verursachen. Natürlich sind neben den ökologischen Erwägungen auch ökonomische Betrachtungen von Bedeutung.

Unter diesen Aspekten sind in den letzten Jahren drei Verfahrensvarianten zur Aufreinigung belasteter Gewässer näher untersucht worden. Zum einen gibt es ein photokatalytisches Abbauverfahren, bei dem der Abbau allein durch Sonnenlicht – oder einer adäquaten Lichtquelle – mit Hilfe katalytischer Mengen Titandioxid (TiO<sub>2</sub>, Weißpigment) erfolgt. Bei dieser Methode werden Elektronen des Halbleiters Titandioxid durch kurzwelliges Licht vom Valenz- in das Leitungsband angehoben, wodurch freie Elektronen sowie sogenannte Elektronenlöcher entstehen. Damit wird TiO<sub>2</sub> zu einem genialen Reagenz, denn es vereinigt gleichzeitig oxidative und reduktive Bedingungen im selben Milieu. Grundsätzlich setzt eine Oxidation des TNT zuerst an

der Methylgruppe (am oberen Ende des Moleküls in Abbildung 1, siehe auch Abbildung 2) an, durch Umwandlung in eine Carboxylfunktion und anschließende Decarboxylierung zum Trinitrobenzol (TNB). Reduzierende Bedingungen dagegen wandeln primär die Nitrogruppen des TNT (NO<sub>2</sub>-Gruppen rechts, links und unten am Benzolring in Abbildung 1, siehe auch Abbildung 2) zu Aminogruppen (NH<sub>2</sub>) um, wodurch 2-Amino-4,6-Dinitro- (2A-4,6-DNT) und 4-Amino-2,6-Dinitrotoluol (4A-2,6-DNT) entstehen. Danach kann es zu einer Vielzahl von weiteren Reaktionen kommen, die schließlich auch zum „Aufknacken“ des Benzolringes und zur Mineralisierung führen. Eine weitere Abbaumöglichkeit ist die chemisch-oxidative Behandlung, die überwiegend auf der Erzeugung von Hydroxylradikalen aus Wasserstoffperoxid oder Ozon basiert, meistens unter gleichzeitiger Einwirkung von UV-Licht. Ganz aktuell ist schließlich noch ein kombiniertes biologisches und photochemisch-oxidatives Verfahren, bei dem in der biologischen Stufe das TNT durch Mikroorganismen u.a. zu den direkten Reduktionsprodukten, den isomeren Aminodinitrotoluolen, transformiert und das gebildete Gemisch nach dieser Vorbehandlung anschließend durch eine Photoreaktion unter Zugabe von Wasserstoffperoxid mineralisiert wird [4].

Für die Praxis sind bei diesen Abbauprozessen zwei Fragen von essentieller Bedeutung:

- Welche Zwischenprodukte entstehen, und können diese eventuell akkumulieren, weil sie unter den gegebenen Bedingungen nicht weiter angegriffen werden?
- Läßt sich das TNT über den Weg der verschiedenen Zwischenstufen mineralisieren, d.h. zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasser (H<sub>2</sub>O) und unbedenklichen anorganischen Stickstoffverbindungen umwandeln?

**Metabolisierung  
und Mineralisierung**

Will man den Abbau eines Schadstoffes untersuchen, so darf man nicht allein das Verschwinden dieser Substanz bewerten, sondern muß aufzeigen, über welche Metabolite der Schadstoff letztlich zu den ungefährlichen Mineralisierungsprodukten wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und anorganischen Salzen umgesetzt wird. Das ist wichtig, weil das Schadstoffpotential einer chemischen Altlast oft mehr durch die Metabolite, als durch die Ausgangsverbindung selbst bestimmt wird. Auch beim TNT sind die im Zuge des Abbaus auftretenden Aminonitroverbindungen (z.B. 2-A-4,6-DNT, 4-A-2,6-DNT in Abbildung 2) aus toxikologischer Sicht kritischer als TNT.

Beim photokatalytischen Abbau z.B. wird das TNT in einer wäßrigen TiO<sub>2</sub>-Suspension mit einer geeigneten Lampe bestrahlt. Dabei muß man einen Quarzkolben verwenden, da für die Anregung der TiO<sub>2</sub>-Valenzelektronen eine Energie von mindestens 3.2 eV entsprechend einer Wellenlänge von 390 nm benötigt wird. Man entnimmt dann während der Abbaureaktion zu bestimmten Zeiten Proben, die nach Aufarbeitung durch gas-(GC) und/oder flüssigchromatographische (HPLC) Methoden auf ihre Inhaltsstoffe hin analysiert werden. Durch solche Versuche ist in Paderborn z.B. gezeigt worden [3], daß beim Abbau des TNT eine Reihe verschiedener, ökologisch und toxikologisch bedenklicher Amino- und Aminonitroverbindungen entsteht, von denen die in Abbildung 3 gezeigten Verbindungen in

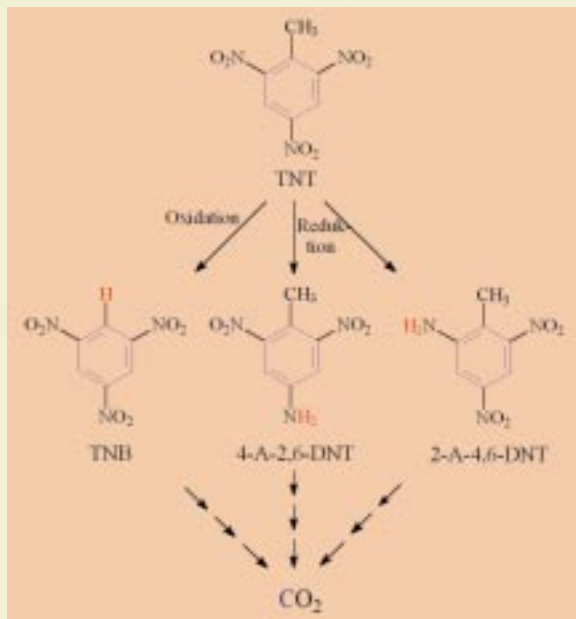


Abb. 2: Metabolisierung und Mineralisierung von TNT.

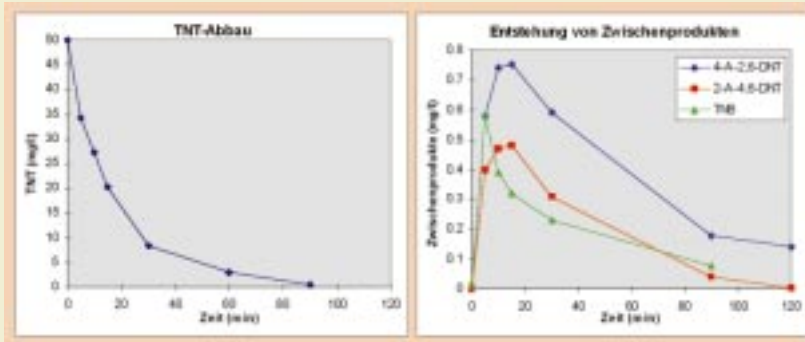


Abb. 3: TNT-Abbau (links) und intermediäre Entstehung von Zwischenprodukten (rechts).

vergleichsweise hohen Konzentrationen zwischenzeitlich auftreten. Während also das TNT durch die Bestrahlung innerhalb weniger Stunden vollständig verschwindet, entstehen gleichzeitig die verschiedenen Metabolite, die aber ihrerseits auch wieder zersetzt werden (siehe Abbildung 3).

Aus diesen und ähnlichen Untersuchungen kann man ableiten, daß TNT z.B. unter den Bedingungen der Photokatalyse abgebaut, aber das Schadstoffpotential dabei nicht unbedingt eliminiert wird. Auch sind bisher nur die dominanten Zwischenprodukte identifiziert worden, die in relativ großer Konzentration intermediär entstehen. Daneben kann man in den Chromatogrammen eine Reihe weiterer Verbindungen erkennen, die in geringen Konzentrationen auftreten und bisher nicht identifiziert worden sind. Es liegen auch noch keine Informationen über den weitere Verlauf der Abbaureaktion nach Öffnung des aromatischen Ringes vor. Hier setzt man mit Tracertechniken an, die es erlauben, die vollständige Mineralisierung des TNT, also das Schicksal der Kohlenstoffatome des Benzolringes, zu untersuchen.

**Die Bilanz muß stimmen**

Erst wenn tatsächlich das gesamte TNT in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und ökologisch unbedenkliche anorganische Salze überführt worden ist, kann man von einem vollständigen Abbau, also von einer Vernichtung des Schadstoffpotentials sprechen. Um diesen Nachweis zu führen, ist an der Paderborner Hochschule ein TNT synthetisiert worden, daß statistisch an jedem C-Atom des Benzolringes ein radioaktives Kohlenstoffatom trägt, ein <sup>14</sup>C-Atom [5].

Dieses Radioisotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5 640 Jahren unter Aussendung von radioaktiven Strahlen (β-Strahlen, d.h. Elektronen), so daß man durch Messung der Radioaktivität bei der Abbaureaktion den Verbleib der Kohlenstoffatome des aromatischen Ringes verfolgen kann. Die Synthese von radioaktiv markierten Verbindungen (Radiosynthese) muß in speziellen Isotopenlabors durchgeführt werden. Glücklicherweise zählt der Fachbereich 13/Chemie und Chemietechnik der Paderborner Universität zu den ganz wenigen chemischen Fachbereichen an deutschen Hochschulen, an denen diese Einrichtung vorhanden ist und an denen daher die Radiotracer-Techniken im Rahmen der Chemieausbildung weitergegeben und in der Forschung eingesetzt werden können. Da es sich im Falle des <sup>14</sup>C-TNT zusätzlich auch um einen Sprengstoff handelt, ist es leicht verständlich, daß diese markierte Verbindung weltweit kommerziell nicht erhältlich ist, so daß z.B. das in Paderborn hergestellte <sup>14</sup>C-TNT in letzter Zeit von verschiedenen Forschergruppen und Firmen bundesweit in mehreren Rüstungsaltslasten-Projekten eingesetzt worden ist.

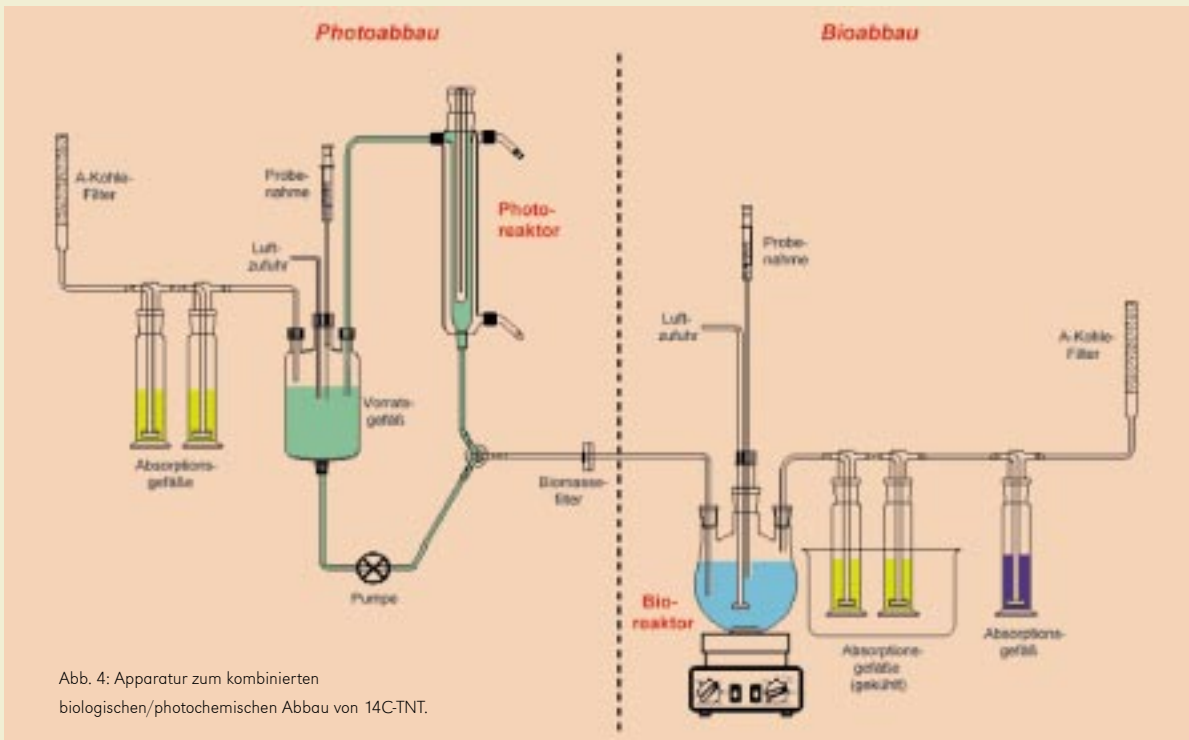


Abb. 4: Apparatur zum kombinierten biologischen/photochemischen Abbau von <sup>14</sup>C-TNT.



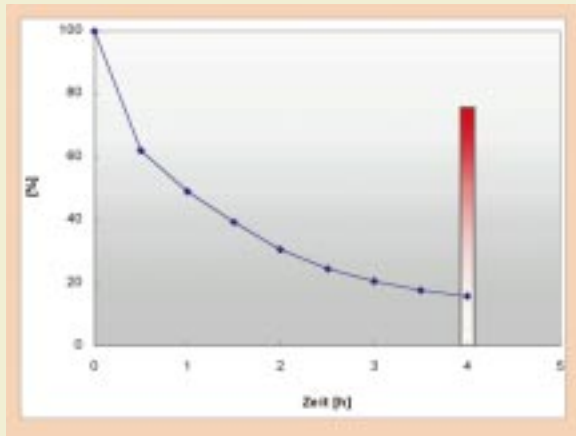


Abb. 5: Abbau des  $^{14}\text{C}$ -TNT (blau) und Entstehung von  $^{14}\text{C}$ - $\text{CO}_2$  (rot).

Der Abbau des radioaktiv markierten TNT muß in einer geschlossenen Apparatur durchgeführt werden (siehe Abbildung 4), damit das bei der Mineralisierung des TNT entstehende  $^{14}\text{CO}_2$  in Waschflaschen mit speziellen Absorptionsmitteln aufgefangen werden kann. Durch Messung der Radioaktivität in diesem Absorptionsmittel kann die entstehende  $\text{CO}_2$ -Menge anschließend quantitativ bestimmt werden.

In Abbildung 4 ist eine Apparatur gezeigt, mit der man den kombinierten biologischen/photochemischen Abbau verfolgen kann. Im rechten Teil der Anlage wird in dem Bioreaktor eine Bakterienkultur eingesetzt, die analog zu einer kommunalen Kläranlage in einer ersten biologischen Stufe das TNT „anknackt“, d.h. erste Metabolisierungen ausgelöst. Dafür wurde eine Belebtschlamm suspension aus dem Gruppenklärwerk in Paderborn-Sande verwendet. Es zeigt sich, daß die darin enthaltene Bakterienkultur ohne weitere Vorbehandlung (d.h. ohne eine Adaption) in der Lage ist, das  $^{14}\text{C}$ -TNT zu transformieren. Man beobachtet aber auch, daß unter diesen Bedingungen die Radioaktivität im Bioreaktor verbleibt und nicht bzw. nur zu unter 0,5 Prozent in den Absorptionsgefäßen auftaucht. Es entsteht also in dieser biologischen Stufe kein  $\text{CO}_2$ , d.h. es kommt nicht zur Mineralisierung. Man muß daher, um das TNT und/oder seine Metabolite zu beseitigen, noch eine chemische Behandlung nachschalten, die in hiesigen Breitengraden wegen der zu geringen Sonneneinstrahlung sicher nicht nach dem photokatalytischen Verfahren, sondern z.B. eher nach einem chemisch oxidativen Verfahren erfolgen könnte.

Dieses Verfahren wird im linken Teil der Anlage (Abbildung 4) durchgeführt. Beide Systeme, sowohl Bio- als auch Photoreaktor, bilden eine geschlossene Einheit, in der nach der Bioreaktion die Abbaulösung in den Photoreaktor umgepumpt und dort weiter bearbeitet werden kann. Als Photoreaktor wird eine Tauchlampe verwendet, die während der Bestrahlungszeit von der Abbaulösung umflossen wird. In beiden Anlagenteilen wird durch Einblasen von Luft sichergestellt, daß gebildetes  $\text{CO}_2$  ausgetrieben und in den Absorptionsgefäßen aufgefangen wird. Das Ergebnis solch eines kombinierten Ansatzes ist in Abbildung 5 dargestellt; sie demonstriert den zeitlichen Verlauf der Abnahme der Radioaktivität im Photoreaktor im Verlauf von 4 Stunden (blaue Kurve) und die nach dieser Zeit entstandene  $\text{CO}_2$ -Menge (roter Balken). Es wird deutlich, daß unter den gegebenen Bedingungen bereits fast 80 Prozent des  $^{14}\text{C}$ -TNT zum

$^{14}\text{C}$ - $\text{CO}_2$  abgebaut worden sind und daß diese Angabe gut mit der restlichen Radioaktivität im Reaktor korreliert, die den noch nicht vollständig mineralisierten TNT-Abbauprodukten entstammt. Ähnliche Ergebnisse werden auch beim direkten photokatalytischen Abbau des TNT, also ohne biologische Vorstufe, erzielt, benötigen aber ungleich mehr Zeit. Damit konnte erstmals belegt werden, daß diese Abbaureaktionen des TNT zwar über eine Vielzahl von Zwischenstufen ablaufen, aber letztlich doch die vollständige Mineralisierung erreichen [5].

#### Wie geht es weiter?

In weiterführenden Experimenten müssen die Abbaubedingungen noch optimiert werden, damit die geschilderte Vorgehensweise zu einem nicht nur ökologisch sinnvollen, sondern auch ökonomisch vertretbaren Verfahren zur Beseitigung der Rüstungsaltplast TNT in technischem Maßstab ausreift. Solche Untersuchungen laufen z.Z. in einem „onsite“-Projekt unter Industriebeteiligung im Rahmen der Sanierung des ehemaligen Werkes Tanne in Clausthal-Zellerfeld.

Will man das Übel an der Wurzel fassen und die Bodenbelastungen durch Sprengstoffe und Sprengstoffabkömmlinge direkt beseitigen, vergrößern sich die Probleme noch. Hier setzt ein bereits seit Jahren laufendes Verbundvorhaben des BMBF zur „Biologischen Sanierung von Rüstungsaltplasten“ an, das bereits so weit gediehen ist, daß seit diesem Sommer, wiederum im Werk Tanne, eine Behandlung von ausgekoffertem Boden vor Ort durch Kompostierungsverfahren im Tonnenmaßstab erprobt wird. Auch in diesem Fall ist unter Einsatz des in Paderborn synthetisierten radioaktiven TNT gezeigt worden, daß bei den verwendeten Verfahren nicht „der Teufel mit dem Beelzebub ausgetrieben wird“, daß also das Schadstoffpotential tatsächlich eliminiert wird. Diese erfolgversprechenden Ansätze sollen aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß die bisherigen Verfahren zur Beseitigung von Gewässer- oder Bodenbelastungen durch Sprengstoffe (nicht allein TNT) und deren Abbauprodukte bei weitem noch keine etablierten und allgemein anerkannten Verfahren darstellen. Es bleibt noch viel zu tun, um auch diese Folgen des Zweiten Weltkrieges zu beseitigen.

(Die hier beschriebenen Ergebnisse entstammen hauptsächlich den Diplomarbeiten von Alice Klapproth, Barbara Pieper und Michael Nahen in der Arbeitsgruppe Fels.)

#### Literatur

1. D. Martinetz und G. Rippen; Militärische Altlasten – Rüstungsaltplasten, Kap. II-2.6 in: Handbuch Umweltchemikalien, G. Rippen (Editor) 3. Auflage (1990), ecomed Verlag Landsberg/Lech.
2. Statusseminar zum BMBF-Forschungsverbund „Biologische Verfahren zur Bodensanierung“, 6./7.5.1998 in Clausthal-Zellerfeld, TerraTech (1998) 33-49.
3. M. Nahen, D. Bahnemann, R. Dillert und G. Fels, J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry, (1997), 101, 191-199.
4. R. Winterberg, R. Dillert, H. Stoffers, D. Bahnemann, Dechema Monographs, 133 (1996) 631-638.
5. A. Klapproth, S. Linnemann, D. Bahnemann, R. Dillert, G. Fels, J. Label. Compds. Radiopharm. 1998, XLI, 337-343.

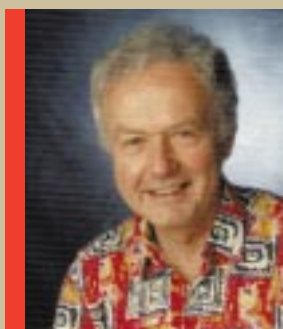
# Primzahlzwillingsrekorde – nicht nur eine Jagd nach Monstern

*Sehr schnelles Rechnen mit sehr großen Zahlen*

„Auch Mathematiker gehen zuweilen auf Rekordjagd“ formulierte die DIE ZEIT am 17. Mai 1996 in ihrem Bericht über den Paderborner Primzahlzwillingsrekord. Hintergrund dieses „sportlichen Erfolges“ war die Entwicklung und Implementierung von Programmen für sehr schnelles Rechnen mit sehr großen Zahlen, wobei „sehr große Zahlen“ in diesem Kontext Zahlen mit Milliarden von Binärstellen bedeuten. Über den ersten Einsatz dieser Programme in der Computational Number Theory, der zu mehreren Weltrekorden führte, wird im vorliegenden Beitrag berichtet; weitere Anwendungsmöglichkeiten in der Numerik und Computeralgebra werden skizziert.

## Primzahlen – Zufall oder Gesetz?

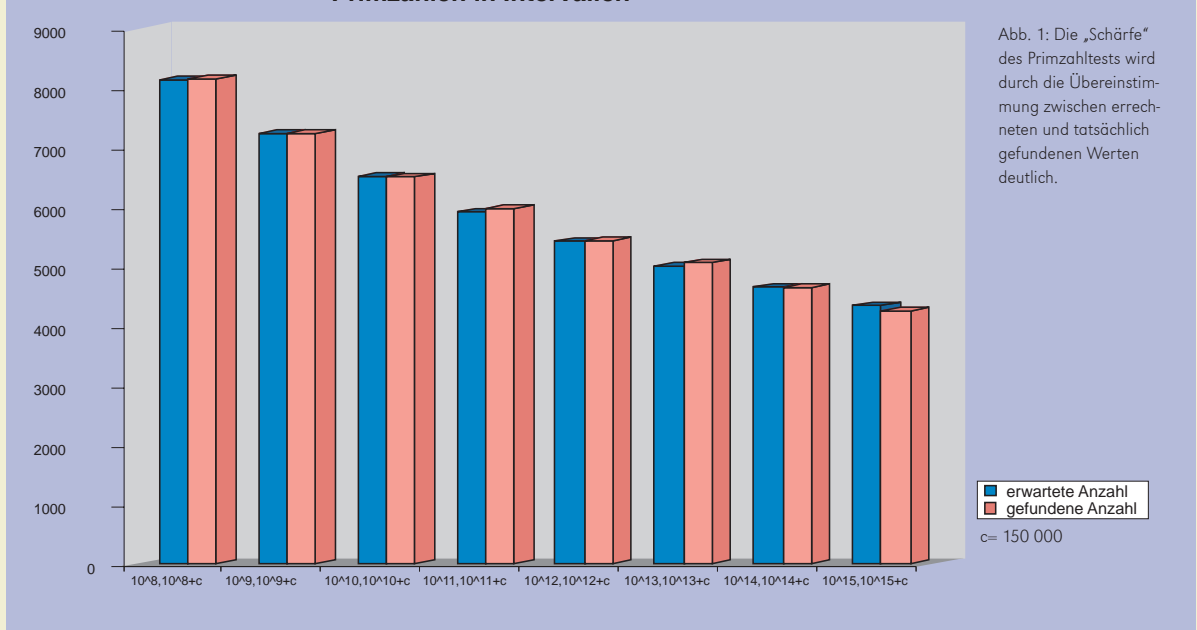
Uns allen ist bekannt: Eine Primzahl ist eine natürliche Zahl größer als 1, die durch keine andere Zahl als durch 1 geteilt wird. Dies ist auch die Definition der Zahlentheoretiker, andere Mathematiker verwenden zuweilen andere Definitionen. So ist etwa für den Funktionentheoretiker eine Primzahl „die ganzzahlige Wurzel einer gewissen analytischen Funktion“, für den Algebraiker ist sie „die Charakteristik eines endlichen Körpers“ oder „eine nicht-archimedische Bewertung“, und der Logiker definiert sie als die „positiven Werte eines geeigneten Polynoms mit 26



**Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karl-Heinz Indlekofer** ist Professor für Zahlentheorie im Fachbereich 17/Mathematik, Informatik der Universität Paderborn. Schwerpunktmäßig beschäftigt er sich auf diesem Gebiet mit analytischen, probabilistischen und computergestützten Fragestellungen.

Variablen“. Wir begnügen uns mit der erstgenannten Definition. Über die Verteilung der Primzahlen haben wir bereits seit Euklid erste Informationen: *Es gibt unendlich viele Primzahlen*. Seine Argumentation gilt bis heute als Paradebeispiel für einen eleganten mathematischen Beweis, den alle in der Schule kennengelernt haben und den auch diejenigen verstehen konnten, für die Mathematik ein Horror war. Angenommen, es gäbe nur endlich viele Primzahlen  $p_1, \dots, p_n$ . Dann wäre das Produkt aller dieser Zahlen plus eins, d.h.  $p_1 \cdot \dots \cdot p_n + 1$ , durch keine von ihnen teilbar und würde damit durch eine Primzahl geteilt, die nicht unter

Primzahlen in Intervallen



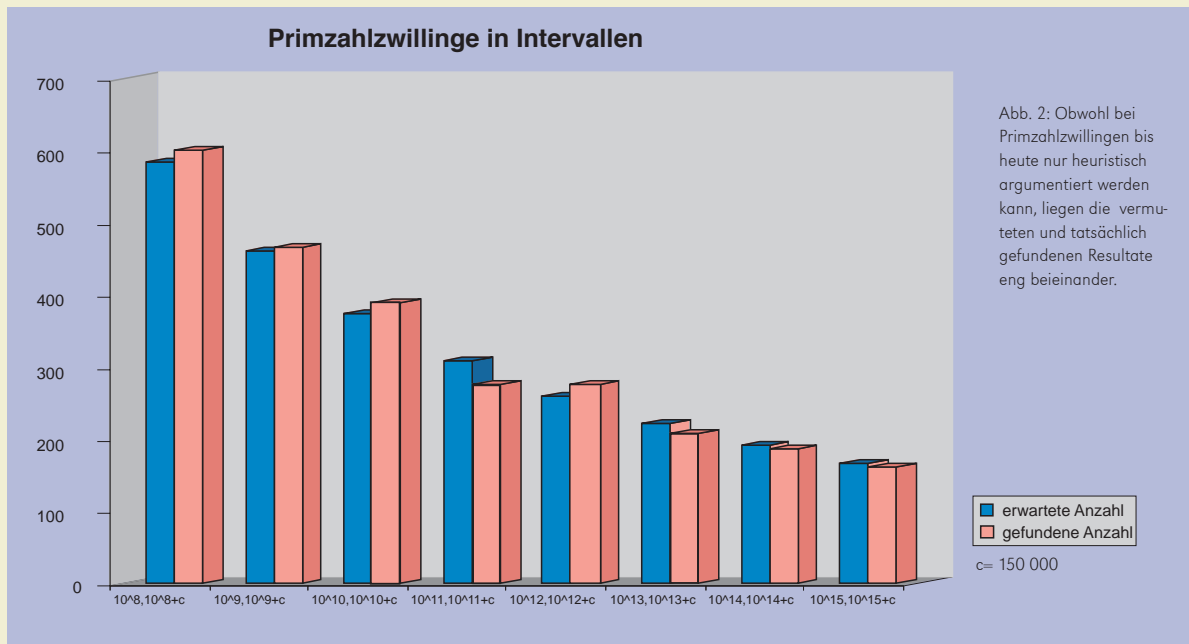


Abb. 2: Obwohl bei Primzahlzwillingen bis heute nur heuristisch argumentiert werden kann, liegen die vermuteten und tatsächlich gefundenen Resultate eng beieinander.

den  $p_1, \dots, p_n$  vorkommt. Dies ist aber ein Widerspruch zur Annahme, so daß es doch unendlich viele Primzahlen geben muß.

Das Resultat läßt sich auch anders formulieren: Die Primzahlfunktion  $\pi(x)$ , die die Anzahl der Primzahlen kleiner als  $x$  angibt, strebt gegen Unendlich, falls dies auch für  $x$  gilt. Ein genaueres Verhalten der Funktion  $\pi(x)$  lag lange Zeit im dunkeln. Gauß vermutete bereits als Fünfzehnjähriger (1792), daß sich der Quotient  $\pi(x)/(x/\log x)$  dem Wert 1 beliebig nähert, wenn  $x$  gegen Unendlich strebt. Doch erst 1896 konnte dieses Ergebnis bewiesen werden. Dieser sogenannte *Primzahlsatz* läßt sich auch statistisch interpretieren: Die Wahrscheinlichkeit für eine natürliche Zahl der Größenordnung  $x$ , eine Primzahl zu sein, ist ungefähr  $1/\log x$ , d.h. in einem Intervall um  $x$  der Länge  $a$  liegen etwa  $a/\log x$  Primzahlen. (Damit dies statistisch sinnvoll ist, sollte  $a$  genügend groß, aber klein im Vergleich zu  $x$  sein.) Entsprechend ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß zwei zufällig (in der Umgebung von  $x$ ) gewählte Zahlen beide Primzahlen sind, etwa  $1/(\log x)^2$ . Bezogen auf *Primzahlzwillinge*, d.h. Paare von Primzahlen, deren Differenz 2 ist, bedeutet dies, daß in Intervallen der genannten Art  $a/(\log x)^2$  Primzahlzwillinge zu erwarten sind. (In Wirklichkeit etwas mehr, da die Tatsache, daß  $n$  prim ist, die Wahrscheinlichkeit für  $n+2$ , prim zu sein, verändert (z.B. ist  $n+2$  dann sicher ungerade).)

Heuristische Überlegungen führen zu der Formel  $C \cdot a/(\log x)^2$  mit  $C=1,3203236316\dots$

für die Anzahl der Primzahlzwillinge zwischen  $x$  und  $x+a$ . Numerische Rechnungen liefern überraschende Übereinstimmungen mit der Theorie, überraschend insbesondere für Primzahlzwillinge, da noch nicht einmal bekannt ist, ob unendlich viele Primzahlzwillinge existieren.

### Primzahltest – Herausforderung für schnelles Rechnen

Die Primzahlen gehören trotz ihrer einfachen Definition zu den willkürlichsten und widerspenstigsten Objekten der Mathematik. Sie scheinen keinem anderen Gesetz als dem Zufall unterworfen,

und es gibt keine Formel, aus der man ablesen kann, ob eine Zahl  $N$  eine Primzahl ist oder nicht. Gewiß, diese Entscheidung läßt sich herbeiführen, indem man  $N$  nacheinander versuchsweise durch jede Primzahl teilt, die kleiner als Wurzel aus  $N$  ist. Geht keine dieser Divisionen auf, ist  $N$  eine Primzahl. Der gravierendste Nachteil dieser Methode: Um mit ihr eine 100-stellige Zahl zu prüfen, braucht der schnellste, zur Zeit verfügbare Prozessor im ungünstigsten Fall mehr als  $10^{36}$  Jahre.

Der sogenannte Miller-Rabin-Test verschafft hier Abhilfe. Dieses Verfahren, das auf einem einfachen zahlentheoretischen Resultat – dem sogenannten *Fermatschen Satz* – beruht, liefert bei eingegebener Zahl  $N$  das Ergebnis „ $N$  ist zusammengesetzt“ oder „ $N$  ist wahrscheinlich prim“. Im ersten Fall ist  $N$  tatsächlich keine Primzahl, im zweiten Fall kann  $N$  zwar auch zusammengesetzt sein, aber die Wahrscheinlichkeit für  $N$ , prim zu sein, ist größer als  $3/4$ . Das Verfahren läßt sich geeignet iterieren, so daß das Endergebnis mit beliebiger Wahrscheinlichkeit korrekt ist. Betrachten wir das obige Beispiel einer 100-stelligen Zahl, so benötigt unser Programm für den probabilistischen Primzahltest ca. 0,4 Sekunden, wobei die Fehlerwahrscheinlichkeit kleiner als  $10^{-6}$  ist.

Haben wir für eine gegebene Zahl  $N$  durch den Miller-Rabin-Test erfahren, daß  $N$  wahrscheinlich prim ist, wie können wir darüber Sicherheit erlangen? Es bieten sich zwei Möglichkeiten für derartige deterministische Tests an: Die eine beruht auf der Theorie der *Kreisteilungskörper*, die andere benutzt tief liegende Eigenschaften *elliptischer Kurven*. Bei den bis heute zur Verfügung stehenden Computern und Implementationen können sie für Zahlen im Bereich von 2 000 bis 3 000 Dezimalstellen eingesetzt werden.

Wie schnell bzw. wie aufwendig sind diese Verfahren? Der vage Begriff „schnell“ läßt sich im Rahmen der Komplexitätstheorie präziser fassen: Eine Methode heißt schnell, wenn sie *polynomielle Laufzeit* besitzt, d.h. bei großen Zahlen  $N$  wird die Laufzeit höchstens mit einer vorgegebenen Konstanten multipliziert, wenn man die Anzahl der Ziffern von  $N$  verdoppelt.

Die erwähnte Kreisteilungskörpermethode besitzt keine polyno-

miale Laufzeit, trotzdem ist die bisher implementierte Version für nicht allzu große Zahlen schnell genug; es können mit ihr Zahlen mit ca. 3 000 Dezimalstellen getestet werden.

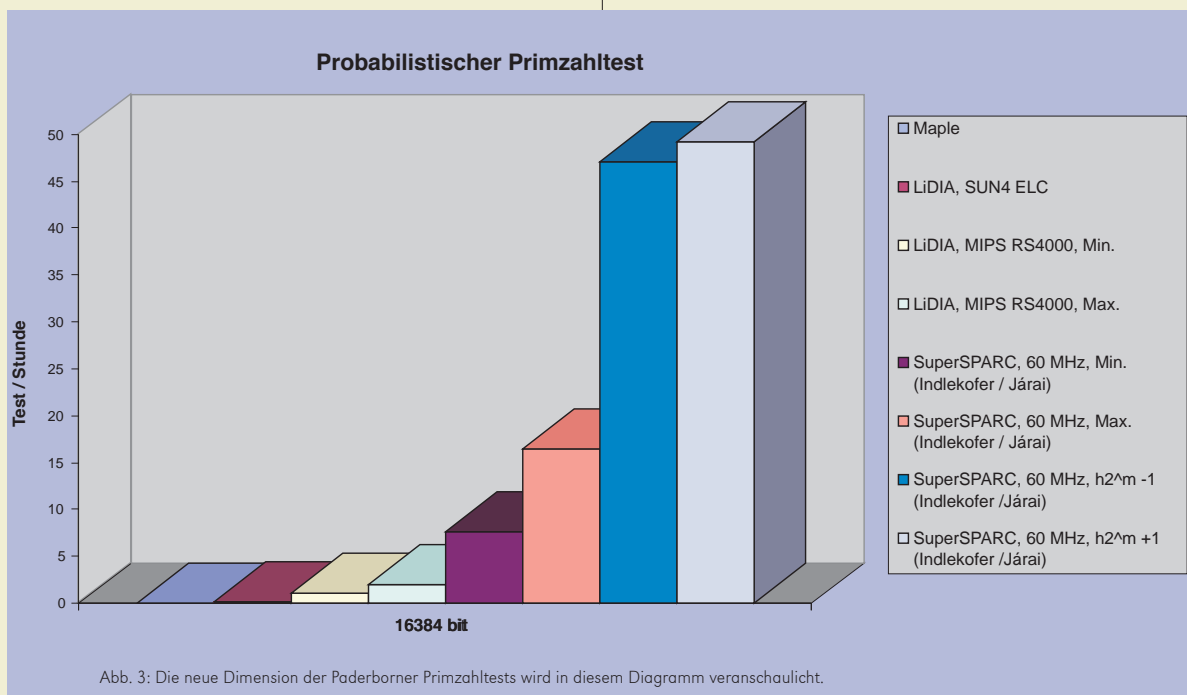
Wir entwickeln zur Zeit ein Test-Programm, das auf der Theorie der elliptischen Kurven beruht und polynomiale Laufzeit besitzt. Heuristische Überlegungen zeigen, daß die Implementation eine Laufzeit  $o(n^4)$  für  $n$ -bit Zahlen haben wird. Dadurch können Zahlen mit bis zu 6 000 Dezimalstellen getestet werden.

Viel schwieriger als das Primzahltest-Problem ist es, eine Zahl  $N$  in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Es gibt (noch) kein Faktorisierungsverfahren mit polynomialer Laufzeit. Diese Tatsache macht man sich in der Kryptographie „mit öffentlichem Schlüssel“ zunutze. Überall dort in der elektronischen Datenübertragung, wo Vertraulichkeit unabdingbar ist oder die Urhebererschaft eindeutig nachweisbar sein soll, kommen derartige Methoden zum Tragen. Eine der bekanntesten ist das nach Rivest, Shamir und Adleman benannte RSA-Verfahren, das als öffentlichen Schlüssel das Produkt zweier großer Primzahlen  $p$  und  $q$  verwendet. Das Ergebnis  $N=p \cdot q$  dieser Multiplikation wird für jedermann zugänglich gemacht. Mit ihm lassen sich Nachrichten chiffrieren. Um den codierten Text zu entziffern, muß der Empfänger jedoch die beiden Faktoren  $p$  und  $q$  kennen. Für einen Unbefugten ist es unmöglich, sie zu ermitteln. Genauer: Hat  $N=p \cdot q$  ca. 300 Dezimalstellen und sind die Primzahlen  $p$  und  $q$  bekannt, läßt sich die Decodierung in weniger als einer Sekunde vornehmen. Um eine 300-stellige Zahl  $N$  zu faktorisieren, wäre (im ungünstigsten Fall) mit den derzeit schnellsten Rechnern mehr Zeit notwendig, als das Universum alt ist.

Um Primzahl-Kandidaten für das RSA-Verfahren zu finden, reicht der erwähnte Miller-Rabin-Test völlig aus. Zahlen mit 200 bis 300 Dezimalstellen werden zufällig ausgewählt und können – falls sie den probabilistischen Test ca. 20-mal „erfolgreich“ bestanden haben – als Faktoren des öffentlichen Schlüssels verwendet werden.

Worauf beruht die Schnelligkeit der Paderborner Primzahltests? Die Ausführung der Primzahltests benötigt nur Multiplikationen und Divisionen. Die Division kann auf die Multiplikation zurückgeführt werden, indem man die Newton-Approximation zur Berechnung der Reziproken verwendet. Damit hängt die Geschwindigkeit der Primzahltests nur von der Schnelligkeit der Multiplikationen ab.

In einem Projekt „Massiv parallele Rechner in der Computational Number Theory“ entwickelten und implementierten wir Algorithmen für das schnelle Rechnen mit sehr großen Zahlen mit bis zu einer Milliarde Binärstellen. Hierbei stellte sich heraus, daß die Multiplikation, wie sie in der Schule gelehrt wurde, nur für Zahlen mit weniger als 100 Binärstellen optimal ist (jeweils abhängig von der Hardware). Ein einfacher algebraischer Trick ist die Grundlage für die rekursive Methode von Karatsuba, die für Zahlen bis zu 10 000 Binärstellen weitaus besser ist. Für noch größere Zahlen sind komplexere Methoden, die auf der Fast-Fourier-Transformation (FFT) beruhen, den anderen Verfahren überlegen. Eine Möglichkeit ist die Gleitkomma-FFT, eine andere die schnelle Multiplikation in Restklassenringen modulo Fermatzahlen, die mit den Namen Schönhage und Strassen verknüpft ist. Welche Methode schneller ist, hängt auch hier jeweils von der Hardware ab. In einem direkten Vergleich, d.h. bezogen auf dieselbe Hardware, mit der bisher bezüglich schnellen Rechnens mit sehr großen Zahlen weltweit führenden Arbeitsgruppe von Schönhage (vgl. [5]) erzielten wir eine ca. 6,5-fache Geschwindigkeitsverbesserung für Zahlen mit etwas mehr als 33 000 Binärstellen. (Daten für größere Zahlen liegen in [5] nicht vor.) Eine derartige Geschwindigkeit(verbesserung) kann nur durch vollständiges Ausnutzen aller Möglichkeiten eines Prozessors erreicht werden, so daß die diesbezüglichen Programme in Assemblersprache (Maschinensprache) verfaßt wurden. Ein weiteres Beispiel macht dies deutlich: Beim Quadrieren einer 500 000-bit-Zahl benötigt das Berechnen des 1 000





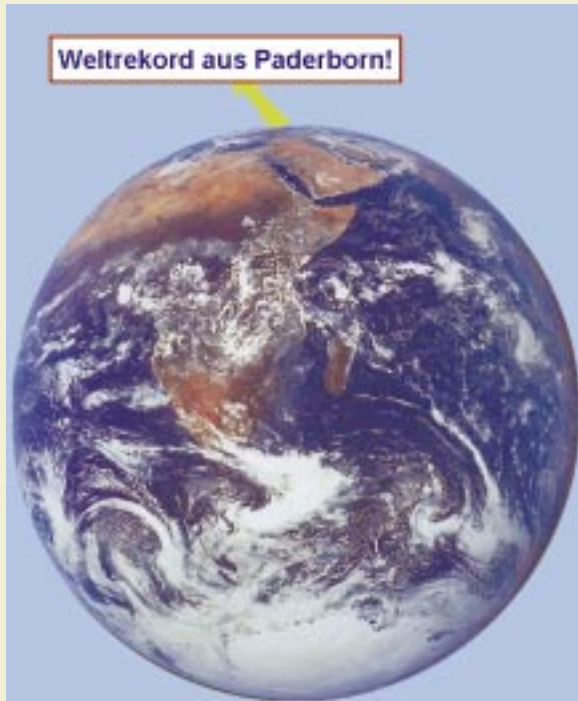


Abb. 4: Ein Ergebnis aus dem Jahre 1995.

000-bit Quadrates auf einer 40 MHz SUN SS10 Workstation 0,305 Sekunden. Das entsprechende, in der Programmiersprache C geschriebene Programm ist dagegen etwa dreimal langsamer. (Für die Schönhage-Strassen-Methode ist die C-Version sogar zwölfmal langsamer.)

**Erste Erfolge – Weltrekorde in der Computational Number Theory**

Kehren wir zurück zur eingangs erwähnten Rekordjagd nach großen Primzahlzwillingen. Salopp gesprochen lief die Suche wie folgt ab: Nach einer einfachen Formel wurden gut hundert Millionen Zahlenpaare bestimmt, unter denen nach einer ähnlich wie oben formulierten Heuristik etwa 2 Primzahlzwillinge vermutet werden konnten. Ließ sich eine dieser Zahlen durch einen Faktor kleiner als 1,4 Billionen teilen, so wurde das betreffende Paar aus dem Rennen gezogen. Knapp 600 000 potentielle Primzahlzwillinge überstanden diese Prüfung. Sie wurden der Reihe nach dem probabilistischen Test unterzogen. Wir hatten Glück, denn bereits beim 55 440. Kandidaten konnte der erhoffte Rekordzwilling gefunden werden. Präziser läßt sich das Such-Prinzip wie folgt beschreiben:

1. Die Suche wurde für die Zahlen in der arithmetischen Progression

$$(3+30 \cdot h)2^{38\ 880} \pm 1$$

geplant. Hierbei war der Exponent 38 880 fest, während sich  $h$  zwischen 0 und  $2^{27}$  bewegte.

2. Aus dieser Folge wurden alle Zahlen herausgesiebt, die einen Faktor zwischen 7 und  $44\ 000 \cdot 2^{25}$  besitzen. Genau 594 866 Kandidaten blieben übrig.
3. Danach durchliefen die Kandidaten einen probabilistischen Primzahltest, zuerst der +1-Fall, danach der -1-Fall, bis ein „wahrscheinlicher Primzahlzwillig“ gefunden wurde. Dies trat bereits beim 55 440. Kandidaten ein.

4. Dieser Zwillig wurde mit exakten Tests (der -1-Fall durch einen Test von Lucas, der +1-Fall durch den Test von Brillhart, Lehmer und Selfridge) überprüft, und dann stand fest:  $242\ 206\ 083 \cdot 2^{38\ 880} \pm 1$  sind Primzahlzwillige.

Eine derartige Suche wird natürlich nicht „ins Blaue“ geplant. Zunächst ist zu beachten, daß Zahlen der Gestalt  $h \cdot 2^m \pm 1$  schnell zu testen sind. (Die CPU-Zeit für einen probabilistischen Test betrug ca. 6,7 Minuten mit einem SuperSPARC 60 MHz.) Aufbauend auf heuristischen Überlegungen für die Verteilung von Primzahlzwilligen in der genannten arithmetischen Progression erwarteten wir 1 500 bis 2 000 CPU-Tage für SUN-Workstations mit SuperSPARC, 33 MHz bis 60 MHz, wobei die Suche auf 20 bis 25 Workstations verteilt wurde. Daß der Versuch bereits nach etwa einem Fünftel der vorgesehenen Zeit beendet werden konnte, war reines Glück!

Wie sich der Primzahlzwillingsrekord im Laufe der Jahre entwickelt hat, wird aus dem Diagramm deutlich (Abbildung 5). Extrapoliert man die bisherige „Entwicklungskurve“, so wäre ein Rekord in dieser Größenordnung erst in einigen Jahren zu erwarten gewesen. In diesem Sinne äußerte sich ein Kollege aus der „Szene“ der Computational Number Theory, Harvey Dubner, in seiner Antwort auf die Nachricht über den neuen Primzahlzwillig: „...But naturally I assumed that the new record would exceed the old one by 2% or perhaps even by 10%.“ Und weiter schreibt er in seiner e-mail: „At first I assumed there was a transmission error and the exponent was an error. However, I tested both numbers and they were indeed probable primes, which of course means they are virtually certainly prime.“

Nun, es sind wirklich Primzahlzwillige!

Dieser Erfolg ermutigte dazu, die Programme für andere Fragestellungen – wie bei Sophie Germain Primzahlen und beim Waring-Problem, bei dem Test von Fermatzahlen, etc. – der Computational Number Theory einzusetzen. Der Lohn der Mühen blieb nicht aus: Weitere sieben Weltrekorde waren die Ausbeute.



Abb. 5: Ein Rekord, der zwar frühestens einige Jahre nach der nächsten Jahrtausendwende erwartet wurde, aber am 31. August 1998 sogar bereits knapp überboten werden konnte.

Ermutigung und Ansporn bedeutet dies aber auch für andere Wissenschaftler. Yves Gallot, ein Elektroingenieur aus Toulouse, entwickelte ein öffentlich zugängliches Programm für Pentium Prozessoren, und am 31. August 1998 konnte Ray Ballinger, ein Mediziner und Assistenzprofessor für Radiologie an der University of Florida, als glücklicher Anwender dieses Programms den Paderborner Rekord knapp überbieten. Das neue Zwillingsspaar lautet

$$835\,335 \cdot 2^{39\,014} \pm 1 \text{ (11 751 Dezimalstellen).}$$

#### Perspektiven –

#### Chancen für Computeralgebra und Numerik

Und der Nutzen? Die Anwendungen bei dem RSA-Codierungsverfahren wurden oben bereits erwähnt, und viele Experten behaupten, man könne nicht genug derartige Primzahlen bekommen. Auch der Einsatz des Programmpakets in der „experimentellen Mathematik“ zur Unterstützung von Vermutungen und zum Untermauern von Heuristiken liegt auf der Hand. Bei weitem wichtiger ist jedoch die Tatsache, daß dieselben Operationen, die den fundamentalen Teil dieser Programme ausmachen, eine maßgebliche Rolle auch in anderen Bereichen spielen, etwa für die Fourier-Transformation mit ihren Anwendungen bei der Signalübermittlung und der Signalverarbeitung in der Informatik und den Ingenieurwissenschaften, um nur einige zu nennen. Ein anderes Beispiel ist die Multiplikation von großen Zahlen und der Zusammenhang mit anderen Verfahren. Die Multiplikation und Division von Polynomen sind grundlegende Operationen in Computeralgebrasystemen, und sie lassen sich direkt auf die Multiplikation von Zahlen zurückführen. Zur Faktorisierung von Polynomen ist eine riesige Menge von Polynom-Multiplikationen und -Divisionen notwendig, und diese sind wiederum grundlegend bei der Vereinfachung algebraischer Ausdrücke. Somit ist die Geschwindigkeit vieler symbolischer Berechnungen abhängig von der Geschwindigkeit der Multiplikation großer Zahlen. Der Einbau unserer Programme in ein Computeralgebrasystem würde bei den entsprechenden Berechnungen eine 100- bis 1 000-fache Geschwindigkeitsverbesserung bewirken. Doch damit nicht genug. Ein sehr schönes Resultat von Schönhage [4] besagt, daß für feste Zahlen  $k$  und  $m$  größer als 1 und für große Zahlen  $n$  die folgenden drei Operationen bis auf einen konstanten Faktor dieselbe Zeit benötigen:

- Multiplikationen von  $n$ -stelligen Zahlen.
- Berechnung von  $(1+x)^{1/k}$  mit einer Fehlergrenze von  $10^{-n}$ .
- Approximative Faktorisierung eines Polynoms  $m$ -ten Grades innerhalb eines Fehlers  $10^{-n}$ .

Der Beweis ist konstruktiv und reduziert die approximative Faktorisierung von Polynomen auf die Multiplikation von immens großen Zahlen.

Dies macht deutlich, daß die Geschwindigkeit der meisten klassischen numerischen Methoden bei geforderter hoher Genauigkeit von der Schnelligkeit der Multiplikationen riesiger Zahlen abhängt. Mit anderen Worten: Die beschriebenen neuen Methoden, die vor 10 bis 15 Jahren noch exotisch anmuteten, sind in der Lage, die Geschwindigkeit von Computerprogrammen in Computeralgebrasystemen und bei numerischen Berechnungen entscheidend zu verbessern.

#### Literatur

- [1] K.-H. Indlekofer, A. Járαι, *Largest known twin primes*, Math. Comp. 65 (1996), no. 213, 427-428.
- [2] K.-H. Indlekofer, A. Járαι, *Largest known twin primes and Sophie Germain primes*, Math. Comp. (1998).
- [3] R. L. Rivest, A. Shamir, L. M. Adleman, *A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems*, Comm. ACM 21 (1978), 120-126.
- [4] A. Schönhage, *The fundamental theorem of algebra in terms of computational complexity-preliminary report*, Univ. Tübingen, 1982, 1-74.
- [5] A. Schönhage, A. F. W. Grotefeld, E. Vetter, *Fast Algorithms: A Multitape Turing Machine Implementation*, B. I. Wissenschaftsverlag, Mannheim, 1994.
- [6] A. Schönhage, V. Strassen, *Schnelle Multiplikation großer Zahlen*, Computing 7 (1971), 281-292.



**Prof. Dr. Antal Járαι** (Eötvös Loránd Universität Budapest) war von 1992 bis 1997 Gastwissenschaftler in der Arbeitsgruppe Zahlentheorie von Professor Karl-Heinz Indlekofer. Neben der Computational Number Theory beschäftigt er sich auch mit Funktionalgleichungen.