

# spektrum

MATHEMATIK • PHYSIK • INFORMATIK



# Editorial

## Wachsende Interdisziplinarität



Prof. Dr.  
Wolfgang Müller  
(Dekan der Fakultät  
für Mathematik  
und Physik)

Die Fakultät für Mathematik und Physik nahm vor mehr als 25 Jahren im Wintersemester 1975/76 ihren Studienbetrieb auf, zunächst in den Lehramtsstudiengängen Mathematik und Physik, kurz darauf auch in den Diplomstudiengängen Mathematik, Physik und Technische Physik. Seit diesen Anfängen war die Arbeit unserer Fakultät von einem hohen Qualitätsanspruch sowohl in der Lehre als auch in der Forschung bestimmt, und zwar im internationalen Vergleich. Dabei spielte immer die Zusammenarbeit mit ausländischen Forschungseinrichtungen eine wesentliche Rolle. Während interdisziplinäre Forschungsansätze schon bald von der Experimentalphysik durch Einrichtung eines Sonderforschungsbereichs mit Kollegen der Chemie erfolgreich durchgeführt wurden - auch unterstützt von der Emil-Warburg-Stiftung - wurden interdisziplinäre Programme in den theoretischen Teilbereichen unserer Fakultät ermöglicht durch den rasanten Aufschwung der Computer und ihrer Anwendungen in den letzten 20 Jahren, deren Effizienz durch die Entwicklung neuer Diskretisie-

rungsverfahren für kontinuierliche Prozesse und neuer kombinatorischer Algorithmen noch gesteigert wurde. Damit kam eine immer noch zunehmende Mathematisierung der Natur- und Wirtschaftswissenschaften in Gang. Computer ermöglichen heute das Arbeiten mit äußerst komplexen Modellen und fördern so die Interdisziplinarität von Forschung und Lehre.

Auf diese Entwicklung ist unsere Fakultät schon Mitte der 80er Jahre eingegangen durch die Einführung des Nebenfachstudiums Informatik und des Diplomstudiengangs Wirtschaftsmathematik. In jüngster Zeit kamen die Diplomstudiengänge Technomathematik und Biophysik hinzu, der eine bedingt durch Besetzung eines Lehrstuhls für Ingenieurmathematik, der andere als Folge einer Umorientierung der Forschungsgebiete bei der Neubesetzung von Lehrstühlen für Experimentalphysik, und ab dem vergangenen Wintersemester in Verbindung mit dem Aufbau der Angewandten Informatik das Hauptfachstudium Informatik (Lehramt und Bachelor).

Mit Blick auf die europäische Integration und eine Erleichterung

des internationalen Studentenaustausches sind in den Fächern Mathematik und Informatik Bachelorstudiengänge eingeführt worden. Daneben werden natürlich die bestehenden Diplomstudiengänge weiter gepflegt, da das deutsche Diplom im Ausland, z. B. in Frankreich, Großbritannien und in den USA nach wie vor hoch geschätzt wird.

Die angedeuteten Veränderungen werden noch deutlicher werden in den folgenden Beiträgen, die die Forschungsschwerpunkte der Fakultät näher beschreiben. Neben der Betonung des Praxisbezugs, der mit der wachsenden Interdisziplinarität unserer Fächer gerade von Laien und Politikern allzu gern gesehen wird, wird aber weiterhin die Vermittlung eines tragfähigen theoretischen Fundaments für das Fachwissen unserer Studenten ein wichtiges Lehrprinzip unserer Fakultät sein, da sonst das bisherige breite Spektrum der Einsetzbarkeit unserer Absolventen geschmälert würde.

W. Müller

## Titelbild



"Mathematik, Physik  
und Informatik an der  
Universität Bayreuth"  
Collage - A. Gaube

## Impressum

**Herausgeber:**  
Der Präsident der Universität Bayreuth

**Redaktion:**  
Pressestelle der Universität Bayreuth  
Jürgen Abel, M.A. (ViSdP)  
Anschrift: 95440 Bayreuth  
Telefon (09 21) 55-53 23/4  
Telefax (09 21) 55-53 25  
pressestelle@uni-bayreuth.de  
http://www.uni-bayreuth.de

Björn Micko  
E. Rößler

**Satz und Layout:**  
PR- und Werbeagentur A-G-SYSTEMS  
Andreas Gaube, Bayreuth  
Telefon (09 21) 5 07 14 41  
spektrum-bayreuth@a-g-systems.de

**Auflage:** 5000 / dreimal jährlich  
**Druck:** Druckerei Heinz Neubert GmbH  
Ritter-von-Eitzenberger-Str.23  
95448 Bayreuth  
Telefon (09 21) 6 47 21

**Kürzungen und Bearbeitung eingesandter Manuskripte behält sich die Redaktion vor. Alle Beiträge sind bei Quellenangaben frei zur Veröffentlichung. Belegexemplare sind erwünscht.**



# Inhalt

## Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik

### Fachbereich Mathematik

Mathematik - Erkenntnisgewinn und Querschnittswissenschaft .....	4
Reelle Analysis .....	8
Algebraische Geometrie und Komplexe Analysis .....	10
Algebra, Zahlentheorie und Diskrete Mathematik .....	12
Numerik, Wiss. Rechnen, Optimierung und optimale Steuerungen .....	14
Mathematische Statistik .....	16
Mathematik und Didaktik - Didaktik der Informatik .....	18

### Fachbereich Physik

Was ist Physik? .....	20
Absolventen der Physik in Bayreuth .....	25
Festkörperphysik .....	26
Makromolekülforschung und Biophysik .....	32
Nichtlineare Dynamik und Strukturbildung .....	38
Physikdidaktik in Bayreuth .....	42
Studienpläne und Lehrerfortbildung .....	43

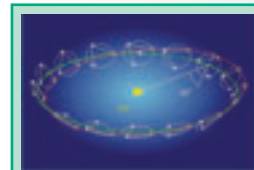
### Fachbereich Informatik

Angewandte Informatik .....	44
Softwaretechnik und Informationssysteme .....	46
Rechnernetze, Parallele und Verteilte Systeme und Grid Computing ..	48
Diskrete Algorithmen .....	50
Simulation und Optimierung komplexer Prozesse .....	51
Gedanken einer Fachschaft .....	52

### Aktuelles vom Campus

Afrikaforschung - exzellent beurteilt .....	53
Nach PISA - brauchen wir eine "neue Lernkultur"? .....	54

*Radiance of the Sea  
- S.6 -  
Mathematik - Erkenntnis-  
gewinn und Querschnitts-  
wissenschaft*



*Das ESA-Projekt LISA - S.15 -  
Optimierung und optimale  
Steuerungen*



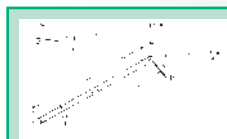
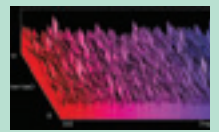
*Doktoranden  
beim Einstellen  
einer Apparatur  
- S. 23 -  
Was ist Physik?*

*Glasübergang - S. 31 -  
Festkörperphysik*



*Mischtrommel - S.42 -  
Physikdidaktik*

*Frequenzanalyse des  
SETI-Projektes - S. 49 -  
Rechnernetze, Parallele  
und Verteilte Systeme  
und Grid Computing*



*Belastung einer  
mechanischen  
Struktur - S. 51 -  
Simulation und  
Optimierung*



#### Redaktioneller Hinweis:

Derzeit lautet die Bezeichnung der Fakultät, die in diesem SPEKTRUM-Heft vorgestellt wird, noch "für Mathematik und Physik". Durch Beschlüsse des Senats und des Hochschulrates der Universität Bayreuth wird sie künftig "Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik" heißen. Das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst muss diese Beschlüsse noch bestätigen.

# Mathematik -

## Erkenntnisgewinn und Querschnittswissenschaft

Mathematik ist die älteste Wissenschaft und damit ein hohes Kulturgut der Menschheit. Dennoch ist der allgemeine Kenntnisstand auf dem Gebiet der Mathematik so gering, wie wohl in keinem anderen Schulfach, gemessen an der Zeitspanne zwischen der Entdeckung neuer mathematischer Erkenntnisse und ihrem Eingang in das Allgemeinwissen jener Bevölkerungsschichten, die eine höhere Ausbildung haben genießen können. Breite Gesellschaftsschichten haben aus dieser Diskrepanz für sich den Schluss gezogen, mit Ihrer Unkenntnis an mathematischem Wissen zu kokettieren. Dem gegenüber steht jedoch die Tatsache, dass in Wissenschaft und Technologie mathematische Methoden einen wachsenden Einfluss gewinnen, nicht selten sogar Motor des Fortschritts sind.

### Mathematik: Schlüsseltechnologie der Gegenwart und Zukunft

Diese Zeit-Diskrepanz zwischen mathematischem Erkenntnisgewinn per se und seiner Bedeutung für unsere Gesellschaft ist aber auch eine Herausforderung für die Mathematiker als Teil dieser Gesellschaft, (noch mehr) ihrer Bringschuld gegenüber der Gesellschaft nachzukommen und ihr Fach der Öffentlichkeit zu präsentieren. Peter Gritzmann, der derzeitige Präsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, meint dazu: "Wenn wir es nicht schaffen, unser Wirken, unsere Bedeutung transparent zu machen, dann wird Mathematik entweder ignoriert oder bestenfalls von der Ignoranz als "Zauberei" oder "Magie" bestaunt." Und weiter: "Aber Mathematik ist auch ein Instrument der Aufklärung. Aufgeklärte Menschen lassen sich nicht so leicht manipulieren, von der Werbung, von Statistiken, von den

Halbwahrheiten unserer Gesellschaft."

Im Jahre 2000 wurde Mathematik vom Nationalen Forschungsrat der USA zu einer von sechs "priority areas" erklärt (neben Biokomplexität in der Umwelt, Informationstechnologie, Nanotechnologie, Lernen für das 21. Jahrhundert und Verhaltensforschung, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften) - mit den höchsten Steigerungsraten bei den Fördermitteln unter allen sechs priority areas.<sup>1)</sup>

Von den meisten unbemerkt, durchzieht die Mathematik als Querschnittswissenschaft fast alle Bereiche unseres Lebens. Ohne Mathematik blieben uns auf immer viele Erkenntnisse der Naturwissenschaften verborgen. Ohne Mathematik gäbe es viele jener technischen Errungenschaften nicht, die wir heute im täglichen Leben so selbstverständlich nutzen. Ohne Mathematik verlören viele der für die Planung und Steuerung der wirtschaftlichen Entwicklung so notwendigen Vorhersagen ihren Boden.

Insbesondere die rasanten Entwicklungen in Forschung und Technologie haben die Mathematisierung der Wissenschaften in den letzten Jahrzehnten stark beschleunigt. Immer leistungsfähigere Computer ermöglichen es, riesige Datenmengen zu speichern, zu verarbeiten und aus ihnen bislang nicht zugängliche Informationen mittels

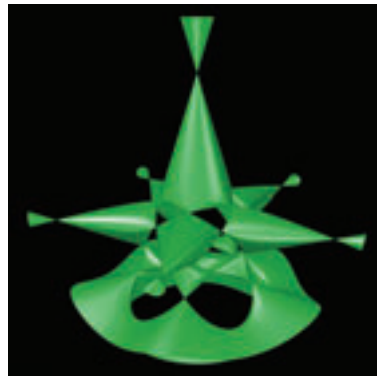
mathematischer Methoden zu gewinnen. Reale Situationen werden mit Hilfe mathematischer Modelle so beschrieben, dass sie auf Rechnern simuliert werden können. Mathematische Modellierung und Simulation ergänzen Experimente, ja man kann sogar Phänomene studieren, die experimentell kaum oder nur mit enormem Kostenaufwand studiert werden können. Mathematische Modellierung und Simulation liefern häufig die kostengünstigere, vielseitigere und ressourcenschonendere Methode. Zwar ist im allgemeinen bekannt, dass der Fortschritt in der Hardwareentwicklung nach wie vor enorm ist, jedoch kommt dem Fortschritt in der Softwareentwicklung mindestens eine gleichwertige Bedeutung zu. Der Beitrag der Mathematik in Form neuer, effizienterer Algorithmen ist häufig entscheidend, um Rechnungen schneller und/oder exakter durchzuführen und damit Probleme lösbar zu machen, die wegen ihrer Komplexität bis dato unlösbar schienen. Mathematik gilt heute als Schlüsseltechnologie.<sup>2)</sup>



Mathematiker: Was machen sie eigentlich?

Nicht nur die Anwendungen der Mathematik, auch die Mathematik als Wissenschaft hat in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung genommen. Das vielleicht spektakulärste Resultat war der Beweis der Fermatschen Vermutung, aufgestellt um 1630 von Pierre de Fermat, dem französischen "Hobymathematiker", Juristen, vielsprachigen Poeten und königlichem Rat am Parlament von Toulouse. Dieser Beweis gelang erst im Jahr 1995 nach jahrelangen Vorarbeiten herausragender Mathematiker und nach vielen Jahren des Forschens in fast gänzlicher Abgeschiedenheit dem Briten Andrew Wiles. Im Fall dieses "letzten Theorems" Fermats<sup>3)</sup> ist die Fragestellung noch jedem Laien verständlich: Es gibt keine natürliche Zahl  $n \geq 3$ , so dass  $x^n + y^n = z^n$  für positive ganzzahlige  $x$ ,  $y$  und  $z$  lösbar ist. Der Beweis dieser Aussage erfordert jedoch Methoden, die nur noch Spezialisten zugänglich sind. Bei anderen berühmten Problemen, etwa den sieben 1-Million-Dollar-Problemen, für deren Lösung die Clay Foundation jeweils 1 Million Dollar als Preisgeld ausgelobt hat, ist schon die Fragestellung sehr komplex.<sup>4)</sup> Vielen mathematischen Problemen ist zu eigen, dass ein unmittelbarer Nutzen nicht erkennbar ist; insbesondere gilt das für Probleme aus der Zahlentheorie, die der berühmte englische Mathematiker Godfrey Harold Hardy vor 60 Jahren noch als garantiert anwendungsfrei ansah. Heute weiß man es besser: Primzahlen und elliptische Kurven (ein zentrales Thema im Rahmen der Fermatschen Vermutung) spielen eine wesentliche Rolle in der Kryptographie, der Lehre von den Verschlüsselungen. Sie liefert heute die Methoden zu allen Fragen der Sicherheit im Umgang mit Computern und im weltweiten Netz. Ein anderes Beispiel: Die Grundlagen der Differentialgeometrie auf abstrakten Mannigfaltigkeiten wurden im 19. Jahrhundert von den deutschen Mathe-

matikern Carl Friedrich Gauß und Georg Friedrich Bernhard Riemann gelegt. Diese Theorie fand dann die überzeugende Anwendung erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts in der allgemeinen Relativitätstheorie. Gerade in den letzten 20 Jahren ist es zu einem fruchtbaren Austausch zwischen Mathematik und Physik, zum Beispiel im Rahmen der so genannten Stringtheorie, gekommen. Hier sind durch physikalische Fragestellungen völlig neue mathematische Konzepte angestoßen worden.



Die Togliatti-Quintik hat die maximale Anzahl von 31 Doppelpunkten. Im Dreidimensionalen werden solche Doppelpunkte von fantasievollen Physikern in der Superstringtheorie mit schwarzen Löchern interpretiert

### Mathematik: Spiegelbild ihrer Vielfalt - Vielfalt ihrer Studiengänge

Die wachsende Bedeutung der Mathematik hat aber auch Rückwirkungen auf die Mathematik selbst. Mathematische Modellbildung, die mathematische Analyse der Modelle, die Entwicklung leistungsfähiger Lösungsverfahren und deren Implementierung auf modernen Hochleistungsrechnern sind Forschungsgebiete, auf denen Mathematiker, Natur- und

Ingenieurwissenschaftler sowie Informatiker verstärkt zusammenarbeiten. Dies hat natürlich Auswirkungen auf universitäre Studiengänge. Neue mathematische Studiengänge wie Technomathematik, Wirtschaftsmathematik, Biomathematik und Wissenschaftliches Rechnen haben sich zu den traditionellen Diplomstudiengängen der Mathematik gesellt, in denen schon immer ein Nebenfach obligatorisch war. Technomathematik, Wirtschaftsmathematik und Biomathematik stehen dagegen auf drei Säulen: Mathematik, Informatik und Wirtschafts- oder Ingenieurwissenschaften oder Biologie/Genetik. Die Universität Bayreuth ist eine der wenigen Universitäten Deutschlands, wo man alle diese Studiengänge außer Biomathematik als Diplomstudiengänge, selbstverständlich neben den traditionellen Lehramtsstudiengängen, studieren kann. Im Rahmen der Technomathematik ist die Spezialisierungsmöglichkeit auf Geoökologie im Hauptstudium sogar einmalig in Deutschland und sehr zukunftsweisend. Seit 2002 gibt es neben diesen Diplom- und Lehramtsstudiengängen noch einen sechssemestrigen Bachelorstudiengang Mathematik, der auch

Die Fachgruppe  
Mathematik -  
Vordere Reihe (v.l.):  
Professor Christian  
G. Simader,  
Professor Adalbert  
Kerber, Professor  
Wolf von Wahl,  
Professor Fabrizio  
Catanese, Professor  
Thomas Peternell,  
Manfred Krämer,  
Hintere Reihe (v.l.):  
Privatdozent Alfred  
Wassermann,  
Privatdozent Ralf  
Kaiser, Privatdozent  
Walter Olbricht,  
Professor Frank  
Lempio, Professor  
Wolfgang Müller,  
Professor Hans  
Josef Pesch,  
Privatdozent  
Christof Büskens  
(Foto: Peter Kolb)

- 1) NFS Fiscal Year 2003 Budget Request, Notices of the AMS, Vol. 49, No. 5, Mai, 2002: <http://www.ams.org/notices/200205/comm-nfsbudget.pdf>
- 2) Siehe: Hans Josef Pesch: Schlüsseltechnologie Mathematik. Einblicke in aktuelle Anwendungen der Mathematik. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 1. Aufl., 2002.
- 3) Lesetipp: Simon Singh, Fermats letzter Satz, München: Deutscher Taschenbuch-Verlag 2000. Eines der wohl schönsten populärwissenschaftlichen Bücher über Mathematik!
- 4) Siehe: [http://www.mathematik.de/01aktuelles/s1\\_2/sieben.htm](http://www.mathematik.de/01aktuelles/s1_2/sieben.htm)



informatische Inhalte einschließt und einen schnellen Weg zu einem ersten berufsqualifizierenden Abschluss bietet. In Kürze wird dieses Angebot ergänzt werden durch einen Masterstudiengang Mathematik, in dem man zur Informatik aus dem Bachelorstudiengang ein weiteres, freiwählbares Fach hinzunehmen kann, sofern in diesem

### Mathematik: eine hervorragende Basis für Erfolg im Beruf

Dem durch weitgehende Unkenntnis geprägten Bild der Mathematik in der Gesellschaft gegenüber stehen nun aber die Fakten, dass "Mathematiker [auf dem Arbeitsmarkt] Mangelware sind", dass "1998 das Stellenangebot für Mathematikerinnen und Mathematiker mit einem Zuwachs von über 50 Prozent das höchste unter allen akademischen Berufsgruppen war" und schließlich, dass "Mathematiker unter allen Naturwissenschaftlern über das höchste Durchschnittseinkommen verfügen". Dies ergaben Untersuchung der "Bundesanstalt für Arbeit" <sup>5)</sup> und der "Deutschen Mathematiker-Vereinigung" <sup>6)</sup> sowie Untersuchungen der "Frankfurter Allgemeinen Zeitung" <sup>7)</sup>.

Und die Süddeutsche Zeitung schreibt dazu: "Rosige Zeiten für die alte, graue Maus Mathematik. Die Aussichten sind nicht schlecht. Der Grund für die neue Perspektive liegt für die Vertreter aus Wirtschaft und Forschung darin, dass in der ständig komplexeren Welt Prognosemodelle geschaffen, Szenarien konzipiert und gerechnet werden müssen. Und Mathematiker verfügen nun mal über logisches, analytisches Denken. In Zeiten "technologischer Umbrüche" ist der Mathematiker gefragt, weil er ordnende Strukturen anbieten kann. Vor allem Mathematiker mit Grundkenntnissen in Programmiersprachen werden vom Arbeitsmarkt regelrecht aufgesogen."<sup>8)</sup>

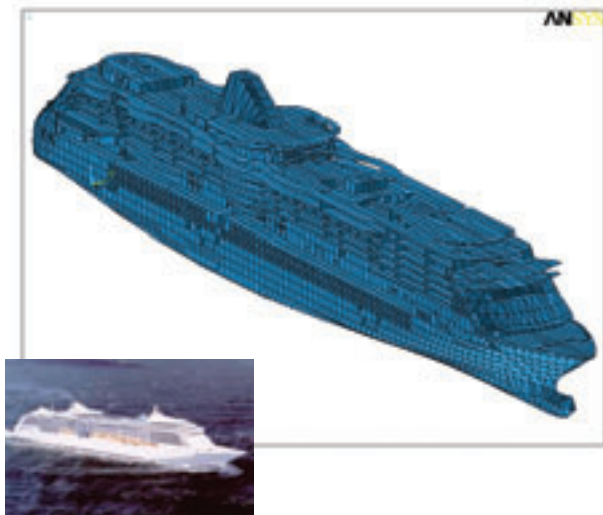
Die Erfahrungen in Bayreuth und an anderen deutschen Universitäten bestätigen dies. Sie zeigen, dass Absolventen mathematischer Studiengänge in der Mehrzahl bereits vor dem Ende ihres Studiums einen Arbeitsvertrag sicher haben, nicht selten haben sie die Qual der Wahl.

Während die Berufschancen für Mathematiker(innen) und Informatiker(innen) seit den 1990er Jahren

boomten, weitgehend unabhängig von konjunkturellen Schwankungen, folgten die Karriere-Chancen der anderen Naturwissenschaftler und Ingenieure schon deutlicher der Konjunktur. Dies bestätigt eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Untersuchung der Berufseinmündungen des Prüfungsjahrgangs 1997, die die HIS Hochschul-Informationen-System GmbH im Jahre 2000 veröffentlicht hat.<sup>9)</sup> Wie bei den Vorgängerbefragungen der Prüfungsjahrgänge 1989 und 1993 wurden bundesweit rund 10000 Absolventen in die Untersuchung einbezogen. Am besten sieht es für Mathematiker und Informatiker aus. Deren Beschäftigungschancen waren im vergangenen Jahrzehnt - anders als die der Ingenieure, Physiker und Chemiker - nur von geringen Schwankungen erfasst.

Dieses Bild spiegelt sich auch in den Zahlen arbeitsloser Akademiker mit Universitätsabschluss wieder. Während sich bei relativ niedriger Arbeitslosenquote die absoluten Zahlen für arbeitslose Mathematiker, Physiker und Informatiker von 1995 bis 2000 in etwa halbierten, nahm die Zahl arbeitsloser Ingenieure nur leicht ab.<sup>10)</sup>

Der zunehmenden Nachfrage nach Absolventen mathematischer Studiengänge stehen jedoch seit den 1990er Jahren zunehmend weniger Studienanfänger gegenüber. In den Diplomstudiengängen Mathematik an den 41 deutschen Universitäten, die diesen Studiengang zulassungsfrei anbieten, gingen die Anfängerzahlen vom Wintersemester 1992/93 von ca. 3600 auf ca. 2750 im Wintersemester 1997/98 zurück. Seitdem steigen die Anfängerzahlen zwar wieder, doch sind sie noch weit von den alten Höchstständen entfernt.<sup>11)</sup> Anders verlaufen dagegen die Zahlen für Informatik-Studiengänge. Die Zahl der Studienanfänger ist zunächst in den Jahren von 1993 bis 1995 von knapp 14000 auf etwa 12500 gesunken, da in dieser Zeit die Nachfrage nach



*Radiance of the Sea: mit Hilfe an der Universität Bayreuth entwickelter mathematischer Methoden (PD Dr. Zillober) gelang es bei der Konstruktion eines der größten Kreuzfahrtschiffe der Welt 2000 Tonnen Stahl einzusparen. Erst dadurch konnte das bei der Jos. L. Meyer Werft in Papenburg gebaute Schiff die Ems befahren und die offene See erreichen.*

Mathematik als Mittel zur Problemlösung eingesetzt werden kann.

In der Lehre trägt die Fachgruppe Mathematik der Universität Bayreuth die Diplomstudiengänge Mathematik (mit einem Nebenfach, in dem mathematische Methoden angewendet werden, meist Informatik oder Physik), Wirtschaftsmathematik und Technomathematik, sodann alle Lehramtsstudiengänge mit dem Fach Mathematik (Grund- und Hauptschulen, Realschulen und Gymnasien), sowie die gesamte Mathematikausbildung für alle natur, ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlichen Studiengänge. Darüber hinaus bietet der Lehrstuhl für Didaktik der Mathematik die Multimedia-Zusatzausbildung für Studierende aller Fachrichtungen an.

Informatikern konjunkturell bedingt deutlich zurückgegangen ist. Als nach 1994 die Nachfrage wieder spürbar anstieg und die Arbeitsmarktprognosen günstig ausfielen, stieg auch die Studienanfängerzahl wieder deutlich an. Mittlerweile hat sie die Rekordhöhe von rund 37500 erreicht. Besonders die Zahl der Studienanfänger an Universitäten ist rasant gestiegen. Sie hat sich innerhalb von zwei Jahren fast verdoppelt.<sup>12)</sup>

Derzeit scheint zwar der Rückgang der Anfängerzahlen in den mathematischen Studiengängen zum Stillstand gekommen zu sein, doch ist vor dem Hintergrund schwächer werdender Schülerjahrgänge ein erneuter Rückgang zu befürchten. Auch dürfte sich die derzeitige Wachstumsschwäche der Wirtschaft kaum positiv auf die Anfängerzahlen mathematischer Studiengänge auswirken, obwohl gerade die Vergangenheit gezeigt hat, dass die Berufschancen von Mathematikerinnen und Mathematikern weitgehend konjunkturunabhängig sind. Man sollte sich bei seiner Studienwahl im übrigen stets davor hüten, diese von Beschäftigungsprognosen abhängig zu machen. Man rät i.A. sogar eher zu einem antizyklischem Verhalten. Begabung und Neigung sollten entscheiden, junge Menschen mit Neugier und Lust auf mathematische Herausforderungen

werden immer gesucht. Mathematikerinnen und Mathematiker sowie Informatikerinnen und Informatiker hatten im abgelaufenen Jahrzehnt stets die besten Berufsperspektiven.<sup>13)</sup>

### Mathematik: in Bayreuth

Entsprechend den (sich verändernden) Schwerpunkten in der Mathematik hat sich auch die Fachgruppe Mathematik an der Universität Bayreuth seit ihrer Gründung in Gruppen organisiert. Derzeit besteht sie aus den sechs Gruppen:

1. *Reelle Analysis, Funktionalanalysis, Partielle Differentialgleichungen und Mathematische Physik*
2. *Algebraische Geometrie und Komplexe Analysis*
3. *Algebra, Zahlentheorie, Kombinatorik und Diskrete Mathematik*
4. *Numerische Mathematik, Optimierung, Optimale Steuerung und Wissenschaftliches Rechnen*
5. *Stochastik und Wirtschaftsmathematik*
6. *Mathematik und ihre Didaktik - Didaktik der Informatik*

Diese Gruppen stellen sich in den folgenden Beiträgen vor.

Weitere Informationen über alle Gruppen entnehmen Sie bitte der Internetseite

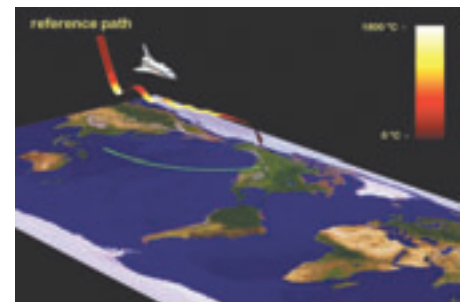
<http://www.uni-bayreuth-de/departments/math/>



*Optimale Bahnplanung von Industrierobotern. Unter allen möglichen Bahnen, entlang denen sich die Greiferhand eines Roboters zwischen zwei vorgegebenen Punkten bewegen kann, so dass sie zu Beginn und Ende vollständig in Ruhelage ist, werden durch Optimale Steuerung diejenigen bzw. diejenige ausgewählt, entlang denen bzw. entlang der entweder die Fahrzeit (gelb) oder ein Kompromiss zwischen benötigter Energie und auftretendem Verschleiß minimal ist.*

*Mithilfe diesen Berechnungen lässt sich durch Vergleich der Trade-off bestimmen: Wieviel Zeit ist man bereit, zur schnellstmöglichen Fahrzeit zuzugeben, um mit den daraus resultierenden Freiheitsgraden den Kompromiss zwischen Energie und Verschleiß zu minimieren. Man erhält damit für den industriellen Einsatz bei der Roboterbahnplanung schnelle, energie- und verschleißminimale Punkt-zu-Punkt-Bahnen. (Lehrst. für Ingenieurmathematik)*

*Atmosphärischer Wiedereintritt eines Raumgleiters. Landung in Nordamerika. Bahn über Grund: grün. Bereiche mit hoher Aufheizung: gelb, mit niedriger: rot. Die Bewegung des Raumgleiters wird durch ein 12-dimensionales System gewöhnlicher Differentialgleichungen beschrieben. Unter allen zulässigen Steuerungen von Auftrieb und Querneigungswinkel dieses "Segelflugzeugs" - es gibt unendlich viele - werden diejenigen berechnet, bei denen das Shuttle während des Fluges die geringste Gesamtaufheizung erfährt.*



- 5) *Siehe: Bundesanstalt für Arbeit, Zentralstelle für Arbeitsvermittlung (ZAV): Arbeitsmarkt-Information 6/1999 für qualifizierte Fach- und Führungskräfte: Mathematikerinnen und Mathematiker. (Versandadresse: Zentralstelle für Arbeitsvermittlung der Bundesanstalt für Arbeit, Arbeitsmarktinformationsstelle, 53107 Bonn)*
- 6) *Siehe: Zowe, J.: Mathematiker sind Mangelware. Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, Heft 4, 1998.*
- 7) *Siehe: Fickinger, N.: Kopfgeld für Akademiker. Frankfurter Allgemeine Zeitung, Beruf und Chance, 6. Februar 1999.*
- 8) *Siehe: Süddeutsche Zeitung, Job & Karriere, 24. März 2002.*
- 9) *Siehe: Holtkamp, R., Koller, P., Minks, K.-H.: Hochschulabsolventen auf dem Weg in den Beruf. Band 143 der Reihe HIS-Hochschulplanung, Hannover 2000.*
- 10) *Siehe: Schreyer, F.: Grundzüge des Akademikerarbeitsmarktes. Arbeits- und Berufsforschung (IAB) der Bundesanstalt für Arbeit, 2001, unter <http://www.arbeitsamt.de/hst/services/bsw/studium/akademikerarbeitsmarkt.pdf>.*
- 11) *Siehe: Wissenschaftliches Zentrum für Berufs- und Hochschulforschung, Universität Gesamthochschule Kassel, 1998, unter <http://www.uni-kassel.de/~bornman/icons/Entwicklung.pdf>.*
- 12) *Quelle: Statisches Bundesamt; siehe: <http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2001/p1020071.htm>.*
- 13) *Hervorragende Informationen rund um das Mathematikstudium liefert: Haite, C., Kramer, R.: Berufs- und Karriere-Planer - Mathematik 2001, Schlüsselqualifikation für Technik, Wirtschaft und IT. Wiesbaden: Vieweg-Verlagsgesellschaft 2001.*

# Reelle Analysis

Die Arbeitsgruppe reelle Analysis besteht aus den Lehrstühlen Mathematik III (Prof. Simader) und Mathematik VI (Prof. von Wahl). Die Arbeitsgebiete sind Differentialgleichungen, Funktionalanalysis und Mathematische Physik. Alle auch derzeit bearbeiteten Forschungsthemen haben ihren Ursprung in der Physik.

Zwei Beispiele werden im Folgenden behandelt.

Dem Lehrstuhl Mathematik VI ist eine weitere, derzeit unbesetzte Professur (das Berufungsverfahren läuft) angegliedert. Diese war seit 1979 mit Prof. Dr. Michael Wiegner besetzt, der 1996 einem Ruf auf einen Mathematiklehrstuhl an der RWTH Aachen folgte. Sein Nachfolger, Prof. Dr. Guido Schneider, nahm zum März 2002 einen Ruf auf einen Lehrstuhl an der Universität Karlsruhe an. - Von 1991 bis 1997 war eine DFG-Forschergruppe "Gleichungen der Hydrodynamik" eingerichtet, bestehend aus den Professoren Simader, von Wahl, Wiegner, dem Physiker Prof. Busse und als externem Mitglied Prof. Dr. H. Sohr (Paderborn). - Zur Arbeitsgruppe reelle Analysis gehören auch vier wissenschaftliche Mitarbeiter, von denen einer habilitiert ist, nämlich Priv.-Doz. Dr. Ralf Kaiser.

## NAVIER - STOKESSCHES SYSTEM

(Christian G. Simader)

Der Lehrstuhl beschäftigt sich in den letzten ca. 20 Jahren hauptsächlich mit den stationären (= zeit-unabhängigen) Gleichungen von Stokes (Parameter  $r=0$ : linear) bzw. Navier-Stokes (Parameter  $r=1$ : nichtlinear) (vgl. Abb. 1). Diese beschreiben das Geschwindigkeitsfeld  $\underline{u}$  und den Druck  $p$  einer zähen, inkompressiblen Flüssigkeit,

die sich unter dem Einfluss einer äußeren Kraft  $\underline{f}$  in einem Gebiet  $G$  des  $n$ -dimensionalen Raumes (physikalisch relevant:  $n=3$ ) bewegt. Es sind dies die Grundgleichungen der Hydromechanik. Dabei ist das lineare Stokessche System ( $r=0$ ) eine immer noch sehr schwierige Vereinfachung des voll nichtlinearen Navier-Stokesschen Systems ( $r=1$ ). Gute Informationen über die Lösungen des linearen Systems lassen dann auch Aussagen über das nichtlineare System zu. Bis vor etwa 14 Jahren waren diese Probleme fast ausschließlich nur in beschränkten Gebieten  $G$  (=Strömung in einem Behälter) mathematisch behandelt worden, nunmehr konnten die Untersuchungen auch auf Außengebiete (=umströmte Körper) oder Strömungen in unendlichen Rohrsystemen oder Schichten ausgedehnt werden. Eine Voraussetzung dafür war das Studium geeigneter Funktionenräume und die Gewinnung von a-priori-Abschätzungen. Hier bestand und besteht eine intensive Kooperation mit Wissenschaftlern aus Italien, Frankreich, USA und Russland. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über

Funktionenräume ließen sich in Zusammenarbeit mit tschechischen Kollegen auch auf ganz andere Problemkreise (nichtlineare Eigenwertprobleme) erfolgreich anwenden. Grundlagenuntersuchungen zum Stokesschen Problem ergaben auch engste Verbindungen zur Elastizitätstheorie. Die genannten Forschungen wurden zwischen 1991 und 1997 im Rahmen der DFG-Forschergruppe "Gleichungen der Hydrodynamik" durchgeführt und werden auch derzeit von der DFG gefördert.

Trotz guter Fortschritte gibt es noch viele offene Fragen, deren Beantwortung auch neue Erkenntnisse über das zugehörige instationäre Problem erlauben. Nicht ohne Grund hat die Clay-Stiftung als eines ihrer sieben Millennium Prize Problems das instationäre Navier-Stokes-Problem ausgewählt und auf seine Lösung einen Preis von 1 Million Dollar ausgesetzt.<sup>1)</sup>

Abb. 1: Stokessches und Navier-Stokessches System

Gegeben:  $G \subset \mathbb{R}^n$  ( $n \geq 2$ ) sei ein Gebiet,  $\underline{f} = (f_1, \dots, f_n) \in C^0(\bar{G})^n$ ,  $\nu > 0$  ein fester Parameter (Zähigkeit)

Gesucht:  $\underline{u} = (u_1, \dots, u_n) \in C^1(G)^n \cap C^0(\bar{G})^n$  und  $p \in C^1(G)$

mit

$$(*) \quad \begin{aligned} -\nu \Delta \underline{u} + r \cdot \underline{u} \cdot \nabla \underline{u} + \nabla p &= \underline{f} \text{ in } G \\ \operatorname{div} \underline{u} &= 0 \text{ in } G \\ \underline{u} &= 0 \text{ am Rande } \partial G \text{ von } G. \end{aligned}$$

Dabei bedeutet (\*):

$$-\Delta u_i + \sum_{k=1}^n u_k \partial_k u_i + \partial_i p = f_i \text{ in } G, \quad i = 1, \dots, n$$

mit dem Laplaceoperator

$$\Delta u := \sum_{k=1}^n \partial_k \partial_k u \quad \text{und} \quad \operatorname{div} \underline{u} = \sum_{k=1}^n \partial_k u_k$$

$r = 0$ : Stokessches System;                       $r = 1$ : Navier-Stokessches System

[1) die genaue Aufgabenstellung findet sich unter der Internetadresse: [http://www.claymath.org/Millennium\\_Prize\\_Problems/Navier-Stokes\\_Equations](http://www.claymath.org/Millennium_Prize_Problems/Navier-Stokes_Equations) ]



# EIN RANDWERT-PROBLEM AUS DER THEORIE DES GEOMAGNETISMUS

(Ralf Kaiser und Wolf von Wahl)

Die Aufgabe besteht darin, das Magnetfeld im Außenraum der Erde zu bestimmen, wenn lediglich die Richtung des Magnetfeldes auf der Erdoberfläche bekannt ist. Dieses Problem hat zwar bei modernen Messungen, die den kompletten Magnetfeldvektor bestimmen, keine Bedeutung mehr, wohl aber bei der Interpretation historischer Magnetfeld-Daten. Vor 1832, als C. F. Gauss eine Methode erfand die Magnetfeld-Intensität zu messen, konnten lediglich Deklination und Inklination, also die Richtung des Magnetfeldes, bestimmt werden. Das Problem taucht auch bei der Interpretation paläomagnetischer Daten auf, die zum Beispiel in bestimmten Gesteinsproben gespeichert sind. Leicht zu extrahieren ist zunächst nur die Richtungs-Information und wiederum besteht das Problem, daraus das komplette Magnetfeld zu rekonstruieren. Dabei gilt es zu bedenken, dass in früheren geologischen Epochen das Erdmagnetfeld eine von der heutigen (im wesentlichen Dipolartigen) Struktur stark abweichende, kompliziertere Struktur gehabt haben kann.

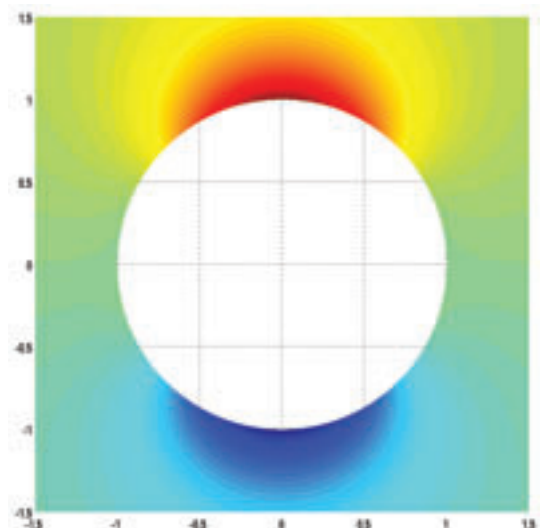
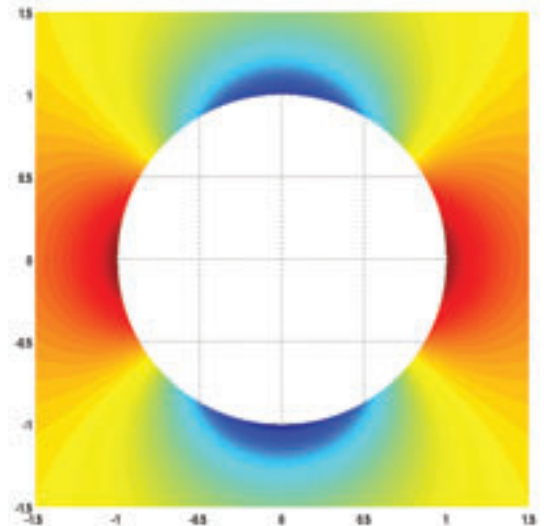
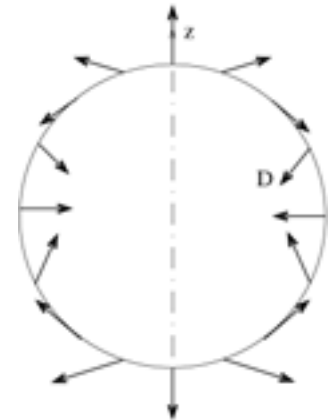
Wir vernachlässigen in erster Näherung Abweichungen von der Kugelform der Erde und betrachten den Außenraum als nichtleitend und frei von Quellen für das Magnetfeld. Dann lässt sich das Problem folgendermaßen formulieren. Gegeben ist ein Richtungsfeld  $D$  auf der Kugeloberfläche  $S$  und gesucht sind alle Vektorfelder  $B$  im Außenraum  $V$ , zusammen mit einer positiven "Proportionalitätsfunktion"  $f$  auf  $S$  derart, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

$\nabla \times B = 0, \quad \nabla \cdot B = 0$	in $V$ ,
$ B(x)  = O( x ^{-3})$	für $ x  \rightarrow \infty$ ,
$B = f D$	auf $S$

Dieses Randwertproblem für harmonische Vektorfelder im Außenraum ähnelt "klassischen" Randwertproblemen aus der Potentialtheorie, bei denen entweder die Normalkomponente oder die Tangentialkomponenten auf dem Rand vorgeschrieben werden. Für die letzteren Randwertvorgaben ist die eindeutige Lösbarkeit wohl bekannt, nicht so für die Richtungsvorgabe. Dies könnte daran liegen, dass das obige Randwertproblem - im Gegensatz zu den klassischen - nichtlinear ist: Die Summe zweier Lösungen  $(B_1, f_1)$  und  $(B_2, f_2)$  zu Richtungsfeldern  $D_1$  und  $D_2$  ist im Allgemeinen keine Lösung zum Richtungsfeld  $D_1 + D_2$ .

Anstelle des allgemeinen Problems kann man zunächst einfachere Modellprobleme untersuchen, z. B. eine 2-dimensionale Version des obigen Problems, d. h. man sucht in der Ebene Lösungen im Äußeren des Einheitskreises, oder man beschränkt sich auf axialsymmetrische Lösungen des obigen Problems. Lässt man die Positivitätsforderung an  $f$  fallen, wird die Lösungsmenge für ein festes Richtungsfeld  $D$  ein Vektorraum. In den Modellproblemen stellt sich heraus, dass dessen Dimension i. Allg. größer als eins ist, d. h. es gibt keine Eindeutigkeit. Im 2-dimensionalen Fall lässt sich weiter zeigen, dass die Dimension durch eine topologische Größe, nämlich die Windungszahl des Richtungsfeldes längs des Einheitskreises bestimmt wird. Im 3-dimensionalen axialsymmetrischen Fall zeichnet sich ein ähnliches Resultat ab. Für das volle Problem stehen bisher ähnliche Ergebnisse aus. ■

Abbildungsreihe: Axialsymmetrisches Richtungsfeld längs eines Meridians (oben), farbkodierte Potentialverteilungen zweier Lösungen zu diesem Richtungsfeld (mitte und unten).



# Algebraische Geometrie und Komplexe Analysis

Die Algebraische Geometrie und die Komplexe Analysis sind zwei der klassischen, aber dennoch hochaktuellen Forschungsrichtungen der Mathematik. Diese beiden Gebiete haben sehr enge Verbindungen untereinander, aber auch zahlreiche fruchtbare Beziehungen zur Differentialgeometrie, Topologie, Zahlentheorie, Algebra, Computeralgebra und zur Theoretischen Physik. Dieses Zusammenspiel verschiedener Forschungsgebiete spiegelt sich auch im Lehrangebot der Arbeitsgruppe wieder. Es müssen regelmäßig Vorlesungsreihen nicht nur in der Algebraischen Geometrie und Komplexen Analysis, sondern auch in den dazu in Verbindung stehenden Gebieten angeboten werden.

Die Algebraische Geometrie und Komplexe Analysis werden an der Universität Bayreuth von den Lehrstühlen Mathematik I (Komplexe Analysis, T. Peternell) und Mathematik VIII (Algebraische Geometrie, F. Catanese) vertreten. Die weiteren Mitglieder der Arbeitsgruppe sind I. Bauer, der/die Nachfolger/-in von F. Schreyer, S. Kebekus (Heisenbergstipendiat) und die Assistenten bzw. DFG-Mitarbeiter/-innen T. Bauer, C. Böhning, T. Eckl, P. Jahnke, I. Radloff, F. Tonoli. Die Arbeitsgruppe ist maßgeblicher Träger des DFG-Schwerpunktprogramms "Globale Methoden in der Komplexen Geometrie" und einer von zwei deutschen Knoten im EU-Forschungsnetz "EAGER (European Algebraic Geometry Research Training Network)". Aufgrunddessen bestehen zahlreiche internationale Kooperationen, unter anderem mit Grenoble, Rom, Pavia, Nancy, Notre Dame (USA), Trento. Insbesondere besteht ein intensiver

Austausch von Doktoranden und Postdoktoranden. Es ist geplant, diesen Austausch in der Zukunft zu intensivieren und zu systematisieren. Hierfür sind die Erfahrungen aus dem Graduiertenkolleg "Komplexe Mannigfaltigkeiten" (1990-1999) und aus dem Graduiertenkolleg "Gruppen und Geometrie" (ab 1998, Göttingen) von großem Nutzen.

Die Algebraische Geometrie und die Komplexe Analysis widmen sich dem Studium komplexer Varietäten, das sind im allgemeinen Lösungsmengen polynomialer Gleichungen. Komplexe Varietäten treten in vielfältigen Zusammenhängen auf: (wie schon gesagt) als

Lösungsräume eines Systems von nichtlinearen Gleichungen, als Räume mit bestimmten Krümmungseigenschaften in differentialgeometrischen Kontexten, als Parameterräume von geometrischen Objekten (z. B. Kurven) oder als Modellräume in der Physik (etwa der Quantenfeldtheorie). Viele verschiedene Bereiche der Mathematik kommen beim Studium komplexer Varietäten zur Anwendung:

- reelle Analysis und partielle Differentialgleichungen,
- Differentialgeometrie,
- symplektische Geometrie,
- (kommutative) Algebra,
- Topologie.

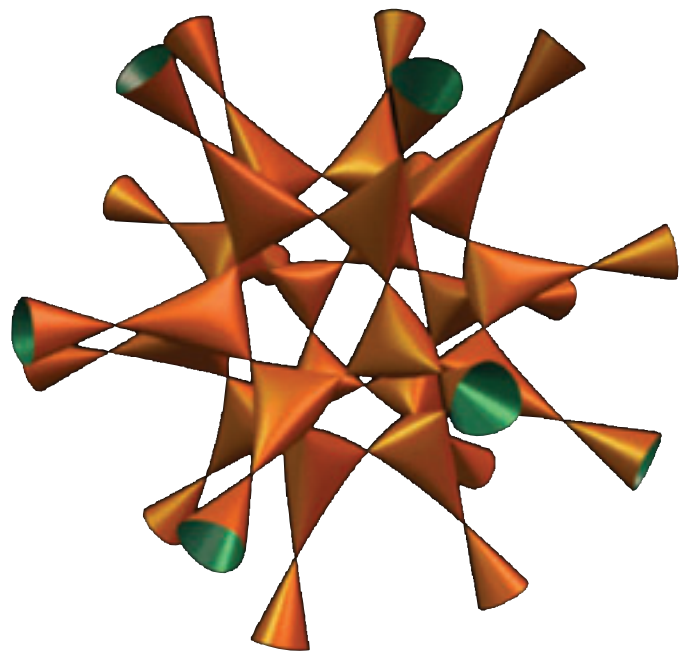


Abb. 1: Die Barthsche Sextik (S. Endrass)

Umgekehrt liefern die Algebraische Geometrie und die Komplexe Analysis auch Anwendungen in anderen Gebieten der Mathematik, etwa der Kodierungstheorie und der Theoretischen Physik (z. B. Stringtheorie). Desweiteren finden Methoden der Algebraischen Geometrie Anwendungen z. B. in der Robotik. Dabei wird vor allem in den letzten Jahren immer deutlicher, daß für die Lösung eines Problems die Anwendungen mehrerer mathematischer Disziplinen notwendig sind. Methodisch verschiedene Zugänge und ihr Zusammenwirken können zu völlig neuen und teilweise unerwarteten Einsichten führen. Auf dieser Grundlage liegt der Schwerpunkt in der Lehre - neben zahlreichen Veranstaltungen für Hörer anderer Fächer - in dem Bestreben, den Studenten eine möglichst breit gefächerte Ausbildung zu gewährleisten, angefangen von einführenden Veranstaltungen bis hin zu Vorlesungen, die an den Stand der Forschung heranführen.

### Was ist Algebraische Geometrie?

Oft treten in der Mathematik oder ihren Anwendungen Systeme polynomialer Gleichungen auf. Die Algebraische Geometrie macht Aussagen darüber, ob es Lösungen gibt, und wenn ja, wie viele. Bereits um 1700 wußte Bézout, wie man die Anzahl der Lösungen von  $n$  allgemeinen Gleichungen in  $n$  Variablen berechnet. Sehr oft gibt es jedoch unendlich viele Lösungen, die dann eine "Mannigfaltigkeit" bilden, welche die Lösungen parametrisiert. Ziel der Algebraischen Geometrie ist es, die Struktur dieser Lösungsgebilde zu verstehen. Seit ca. 200 Jahren bemühen sich darum viele der besten Mathematiker der Welt. Pioniere waren hier Abel, Jacobi und später Riemann, und es zeigte

sich, daß transzendente, "holomorphe" Funktionen mehrerer Variablen eine wichtige Rolle spielten. Dies war die Geburtsstunde der Komplexen Analysis. Seit dem sind Algebraische Geometrie und Komplexe Analysis (in mehreren Variablen) eng verbunden; algebraische und transzendente Methoden durchdringen sich gegenseitig. Durch Riemann, Levi-Civita und Minkowski kamen dann noch die differential-geometrischen Methoden ins Spiel: man konnte von Metriken, Krümmung und Geodätischen reden. Ohne das geometrische Konzept der Krümmung hätte Einstein die allgemeine Relativitätstheorie nicht entwickeln können. Holomorphe Funktionen einer Variablen sind bereits von Euler, Cauchy und Gauss vor und kurz nach 1800 eingehend studiert worden. Einen Höhepunkt stellen wieder die Ergebnisse von Riemann dar; man denke insbesondere an die berühmteste Vermutung in der Mathematik, die Riemannsche Vermutung über die Nullstellen der Zeta-Funktion (eines der 1 Million-Dollar-Probleme). Seitdem gibt es enge Verbindungen der Komplexen Analysis und Algebraischen Geometrie zur Zahlentheorie, weil man oft algebraische Erweiterungen von Körpern durch spezielle Werte von gewissen holomorphen Funktionen (elliptische oder Modul-Funktionen) erzeugen kann.

In den 40er-50er Jahren gab es eine Revolution in unserem Arbeitsbereich: völlig neue Methoden (Garben und Kohomologie und andere Methoden, die aus der Topologie stammen, analytische Methoden wie z. B. harmonische Formen und extremale Abbildungen oder Metriken) wurden entwickelt.

Insbesondere stellte Grothendieck die Algebraische Geometrie auf eine neue Grundlage durch den Begriff des Schemas, einer weitge-



Abb. 2: Eine Kummerfläche (S. Endrass)

henden Verallgemeinerung des Mannigfaltigkeitsbegriffs. Dadurch erhielten Algebraische Geometrie und Arithmetische Zahlentheorie eine gemeinsame Grundlage, was sich z. B. für die Lösung der Fermat-Vermutung durch Wiles als unabdingbar erwies.

Neben der theoretischen Methoden spielt auch die Computeralgebra in jüngerer Zeit eine immer größere Rolle in der Algebraischen Geometrie.

### Einige Schwerpunkte der Forschungsarbeit der Bayreuther Arbeitsgruppe sind:

1. Algebraische Flächen, d. h. komplex zweidimensionale Varietäten, ihre globale Struktur und Moduli.
2. Topologie und Hodgetheorie algebraischer Varietäten.
3. Positive gekrümmte Mannigfaltigkeiten (sogenannte Fano-Mannigfaltigkeiten).
4. Klassifikationstheorie höherdimensionaler Varietäten. ■



# Algebra, Zahlentheorie und Diskrete Mathematik

Die Algebra hat eine lange Geschichte, das zeigen schon die klassischen Probleme der griechischen Mathematik wie die Quadratur des Kreises, Verdoppelung des Würfels, Dreiteilung des Winkels. Die Schwierigkeit dieser Probleme wurde geradezu sprichwörtlich. Erst Jahrhunderte nach ihrer Formulierung konnte mit algebraischen Methoden bewiesen werden, dass sie nicht mit Zirkel und Lineal lösbar sind.

Bei fast allen mathematischen Phänomenen gibt es algebraische Aspekte. Computer z.B. arbeiten mit algebraischen Mitteln. Anwendungen der Algebra sind auch sonst im täglichen Leben allgegenwärtig, z.B. in Handys, bei der Decodierung von Musik beim Abspielen von CDs usw.

In der Algebra findet viel Grundlagenforschung statt, andererseits werden Anwendungen intensiv vorangetrieben. Sie zeichnet sich durch hohes Abstraktionsniveau und sehr anspruchsvolle direkte Argumente aus. Sie liefert mächtige Werkzeuge, insbesondere wenn es - auch in Anwendungsgebieten wie etwa der Physik - um die Vereinheitlichung scheinbar disparater Phänomene geht. Für direkte Anwendungen bietet sie viele besonders wirkungsvolle Algorithmen an.

Die Lehrstühle II und IV am Mathematischen Institut befassen sich schwerpunktmäßig mit diversen Teilgebieten der Algebra und ihrer Anwendungen, die unter dem Oberbegriff Darstellungstheorie zusammengefasst werden können. Am Lehrstuhl II (Prof. Dr. Adalbert Kerber) geht es vor allem um die Darstellungstheorie endlicher Gruppen, insbesondere symmetrischer Gruppen und um die konstruktive Theorie Diskreter Struk-

turen durch Anwendung von Permutationsdarstellungen, während das Schwergewicht am Lehrstuhl IV (Prof. Dr. Wolfgang Müller, Prof. Dr. Manfred Krämer) bei der Darstellungstheorie von Ringen und Algebren sowie von Liegruppen liegt.

U.a. veranschaulichen dies die folgenden Bücher:

- A.Kerber: Representations of Permutation Groups, I/II, Springer-Verlag 1971, 1975.
- W. Müller: Darstellungstheorie von endlichen Gruppen, Teubner 1980
- G.D. James, A. Kerber: Representation Theory of the Symmetric Groups, Encyclopedia of Mathematics, vol. 16, 1981
- J. Tits, unter Mitarbeit von M.Krämer und H.Scheerer: Liesche Gruppen und Algebren, Springer 1983
- A. Betten, H. Friepertinger, A. Kerber, A. Wassermann, K.-H. Zimmermann: Codierungstheorie, Springer-Verlag 1998
- A.Kerber: Applied Finite Group Actions, Springer, 2. Auflage 1999

Als Textbücher zur Lehre sind veröffentlicht:

- W.Müller: Lineare Algebra, 3. Aufl. Bayreuther Math. Schriften 62 (2001)
- W. Müller: Algebra, Bayreuther Math. Schriften 57 (1999)
- M. Clausen, H. Meier-

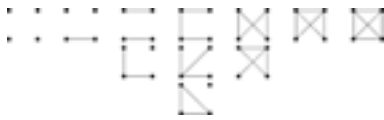
Reinhold, A. Kerber: Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler, Selbstverlag, 3. Aufl. 2001

Neben der Grundlagenforschung wurden am Lehrstuhl II im Rahmen von DFG- oder BMBF-Projekten Softwarepakete implementiert, gemeinsam mit der Informatik (Prof. Dr. Laue, Dr. Kohnert). Sie gehören auf ihren Gebieten zu den weltweit leistungsfähigsten und werden weltweit in Forschung, Lehre und Industrie benutzt:

- SYMMETRICA (Darstellungstheorie symmetrischer Gruppen),
- MOLGEN (Generator für chemische Strukturformeln),
- DISCRETA (Generator für kombinatorische Designs),
- UNIMOLIS (Lehr- und Lerneinheit zum Isomeriebegriff).

Gruppen und zugehörige Ringe und Algebren (Gruppenalgebren) werden angewandt, wenn Probleme oder Systeme Symmetrien besitzen. Symmetrieansätze sind in den Naturwissenschaften oft die einzige Möglichkeit, Probleme anzupacken, sie sind dort sozusagen "das tägliche Brot". Weitere Verwendungen finden sie bei Klassifikationsfragen, etwa in der Konstruktion von Wechselwirkungsmodellen. Ein Beispiel sind die Strukturformeln der Chemie, Modelle für Wechselwirkungen zwischen den Atomen des jeweiligen Moleküls (vgl. den Beitrag der

Informatik). Bilaterale Wechselwirkungen werden durch unnummerierte Graphen veranschaulicht. Abgebildet sind die unnummerierten Graphen mit 4 Punkten, also die sämtlichen Modelle für bilaterale Wechselwirkungen zwischen 4 Personen, 4 Staaten, 4 Atomen, ...



Auch kombinatorische Designs werden am Lehrstuhl II konstruiert (man findet sie beispielsweise als Systemtipps im Lotto), u.a. das weltweit erste 7-Design mit kleinen Parametern, was durch einen Artikel in der deutschen Version des Scientific American ("Spektrum") gewürdigt worden ist. Bibliotheken zur Kombinatorischen Chemie sind in Zusammenarbeit mit der Industrie generiert worden. Die entsprechende Weiterentwicklung der konstruktiven Theorie Diskreter Strukturen - mit algebraischen Methoden - ist in vollem Gange.

Am Lehrstuhl II wird auch die Algebraische Codierungstheorie vorangetrieben. Überall wo Daten gespeichert und übertragen werden, kann man sie codieren, damit "fehlerkorrigierende Codes" Übertragungsfehler im Nachhinein in gewissem Umfang korrigieren können. Beispielsweise ermöglicht die Algebraische Codierungstheorie die Rekonstruktion eines halben Zentimeters der Tonspur auf einer CD, wenn die Übertragung dieses Stücks etwa durch einen Stoß am Walkman gestört worden sein sollte.

Eines der Arbeitsgebiete des Lehrstuhls Mathematik IV ist die modulare Darstellungstheorie, ein tief liegendes Gebiet, das hier aus Platzgründen nicht ausgeführt wird. Weiterhin wird die mathematische Theorie der geometrischen Ornamente bearbeitet (vgl. dazu auch Spektrum Nr. 2/1993). In jüngster Zeit wurden hier die periodischen zweifarbigen Flechtornamente klassifiziert, in deren

Symmetriegruppen neben Bewegungen auch Vertauschungen der Farben und der Oberseite mit der Unterseite existieren. Diese Gruppen sind bis auf Isomorphie Untergruppen der 4-dimensionalen Raumgruppen. Bei den Streifenornamenten gibt es dann genau 59 und bei den Ebenenornamenten 215 Symmetrietypen. Ein Beispiel ist abgebildet. (Abb. 2, rechts)

Ein weiteres Arbeitsgebiet ist die Theorie der symmetrischen diophantischen Gleichungssysteme. Sie treten z.B. bei magischen Quadraten auf. Bei  $8 \times 8$ -Quadraten wurden verschiedene Typen genauer studiert, z.B. die pandiagonalen Quadrate, in denen alle Zeilen, alle Spalten und alle Diagonalen (auch die zu den Hauptdiagonalen parallelen Diagonalen) die gleiche Summe haben und alle W-Quadrate, in denen jedes  $2 \times 2$ -Teilquadrat die halbe Zeilen- bzw. Spaltensumme hat. Während es mehr als 18.000 disjunkte Teilklassen von pandiagonalen  $8 \times 8$ -Quadraten gibt, auf denen eine Gruppe der Ordnung 521.838.526.704 transitiv und treu operiert, existieren bei den W-Quadraten genau 8128 Klassen, auf denen eine Gruppe der Ordnung 2.654.208 ebenso operiert. Ein spezielles pandiagonales Quadrat mit Summe 260 ist.

1	16	17	32	50	63	34	47
52	61	36	45	3	14	19	30
5	12	21	28	54	59	38	43
56	57	40	41	7	10	23	26
15	2	31	18	64	49	48	33
62	51	46	35	13	4	29	20
11	6	27	22	60	53	44	37
58	55	42	39	9	8	25	24

Ein weiterer Schwerpunkt am Lehrstuhl IV ist das Studium unendlicher kontinuierlicher Gruppen (Liegruppen). Ein einfaches Beispiel etwa ist die Menge aller Drehungen des Raumes um einen festen Ursprungspunkt, aber um alle möglichen Achsen und

Winkel. Diese Gruppe heißt  $SO(3)$  und gehört zum 3-dimensionalen Anschauungsraum. Allgemeine Liegruppen sind entsprechende Verallgemeinerungen in beliebiger Dimension  $n$ . Am Lehrstuhl untersucht werden Darstellungen solcher Gruppen unter verschiedenen Aspekten und sogenannte homogene Räume. (Ein einfaches Beispiel eines homogenen Raumes der oben erwähnten Gruppe  $SO(3)$  ist die Kugeloberfläche.) Klassifiziert worden sind z.B. sogenannte sphärische homogene Räume.

Seit etwa 20 Jahren hat sich, wesentlich inspiriert von der Physik, die Theorie der sogenannten Quantengruppen entwickelt, eine Verallgemeinerung der Theorie der Gruppen und verwandter Objekte. Quantengruppen sind sehr komplexe algebraische Strukturen, mit denen sich der Lehrstuhl IV ebenfalls beschäftigt.

Zuletzt sei noch auf ein besonderes Phänomen hingewiesen. Bei den Liegruppen trifft man klassischerweise auf folgende Muster von Diagrammen, die sogenannten ADE-Diagramme:

(Die ersten beiden Diagramme können beliebig lang sein, beim dritten Typ ist die Anzahl der Ecken 6, 7 oder 8.)

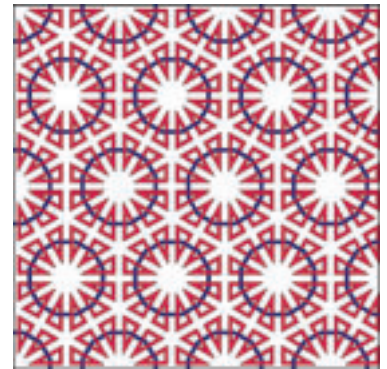


Abb. 2



Die Mathematiker haben nun die interessante Entdeckung gemacht, dass dieselben Muster in einer ganzen Reihe anderer scheinbar disparater mathematischer Gebiete auftreten, u.a. bei den Spiegelungsgruppen, in der Singularitätentheorie, in der Darstellungstheorie der Algebren. Dieses sogenannte "ADE-Phänomen" gilt als ein starker Beleg für die innere Einheit der Mathematik. ■

# Numerik, Wissenschaftliches Rechnen, Optimierung und optimale Steuerungen

Mit dem Aufkommen elektronischer Rechenanlagen hat sich eine Teildisziplin innerhalb der Mathematik stürmisch entwickelt, die numerische Mathematik oder kurz Numerik. Sie befasst sich mit der Theorie und Praxis der Simulation, Approximation und Analyse mathematischer Modelle auf dem Computer. Teure reale Experimente werden kostengünstig am Computer mittels numerischer Verfahren simuliert und mathematisch optimiert. Bei komplexen Anwendungsproblemen wirken Mathematiker, Informatiker und Wissenschaftler des jeweiligen Anwendungsgebietes zusammen; dabei ist ein weiteres interdisziplinäres Gebiet entstanden, das sogenannte wissenschaftliche Rechnen.

Die Numerik ist Oberbegriff für viele Bereiche der "praktischen" Mathematik, bei der zur Lösung von Anwendungsproblemen konstruktive mathematische Methoden computerunterstützt eingesetzt werden. An der Universität Bayreuth werden durch den Lehrstuhl für Angewandte Mathematik (Prof. Lempio), die Professur für Angewandte Mathematik (Prof. Grüne) und den Lehrstuhl für Ingenieurmathematik (Prof. Pesch) u. a. die folgenden Gebiete in Forschung und Lehre vertreten:

## Optimierungsmethoden

bilden einen wesentlichen Bestandteil der mathematischen Methoden des Operations Research. Inhaltlich geht es dabei um

die Bewertung von Entscheidungen in Wirtschaft und Technik. Schwerpunkte sind Verfahren zur Lösung linearer Optimierungsprobleme, nichtlineare Optimierungsmethoden, dynamische Optimierung, Netzwerkflussprobleme, ganzzahlige und kombinatorische Optimierung, Fuzzy Methoden, neuronale Netze, genetische Algorithmen. Im Rahmen des INNOVATEC-Programms des Deutschen Akademischen Austauschdienstes konnte für dieses Gebiet für die Dauer eines Jahres ein Gastlehrstuhl (Prof. Petar Kenderov, Bulgarische Akademie der Wissenschaften) eingeworben werden. Die Zusammenarbeit wird auf dem Gebiet der Curriculum-Entwicklung an der Universität Bayreuth und an verschiedenen Hochschulen in Sofia fortgesetzt.

## Mengenwertige Numerik

ist ein aktuelles Teilgebiet der Numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens, in dem es schwerpunktmäßig um die numerische Approximation von Mengen geht. Dies können zulässige Mengen für Optimierungsprobleme, Erreichbarkeitsmengen für Regelungsprobleme, Lösungsmengen von Steuerungsproblemen sein. Ein Teilprojekt war hier die

Berechnung aller zulässigen Steuerungen für ein auf einem Szenario des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung "Globale Umweltveränderung" aufbauendes Klimamodell von Petschel-Held, Schellnhuber, Bruckner und Tóth. Bei diesem Modell geht es darum, Steuerungen zu finden, für die die Zustände möglichst lange zulässig ("viable", "lebensfähig") bleiben. Ausgehend von Kontakten mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung konnte für dieses Modell im Rahmen eines Dissertationsprojektes (Dipl.-Ing. I.A. Chahma) die Menge aller zulässigen Steuerungen für die kommenden 200 Jahre berechnet werden.

## Regelung

komplexer technischer Prozesse erfordert heutzutage aufgrund der großen Dimensionen der dabei entstehenden Gleichungen ebenfalls numerische Verfahren und Computerunterstützung. Typische Regelungsaufgaben sind oftmals auf einem sehr großen Zeithorizont gestellt: Ein mittels ESP stabilisiertes Fahrzeug soll bis zum Ende seiner Lebensdauer stabil auf der Straße liegen, eine Raumstation soll für beliebig lange Zeiten ihrer vorgegebenen Bahn folgen usw. Selbst Hochleistungscomputer



können allerdings auf großen Zeiträumen nicht fehlerfrei rechnen, was zu Problemen bis hin zum Versagen solcher Regelungen führen kann. Um solche Situationen zu vermeiden, werden derzeit in einem gemeinsamen Projekt mit dem Department of Electrical Engineering der University of Melbourne, Australien, präzise mathematische Kriterien für die sichere Funktion computergestützter digitaler Regelungen erarbeitet.

### Optimale Steuerung

ist ein Teilgebiet der angewandten Mathematik mit vielseitigen Verknüpfungen zur Numerik und zum wissenschaftlichen Rechnen. Im Vordergrund stehen Fragen wie beispielsweise nach der optimalen Steuerung von Automobilen im fahrdynamischen Grenzbereich, einer optimalen Medikation bei der Chemotherapie, der gewinnmaximalen Führung von Unternehmen, dem optimalen Schub- und Steuerungsverlauf für neue Raumtransportersysteme oder Niedrig-Schub-Raumfahrzeuge, der zeit-, energie- und/oder verschleißoptimalen



Echtzeitoptimalsteuerung des Industrieroboters IRB6400.

Steuerung von Industrierobotern oder dem sicheren Flug von Verkehrsflugzeugen bei Fallwinden. Die Vielzahl dieser Fragestellungen, die sich allesamt mit *einer* mathematischen Theorie und kunstvoll ersonnenen numerischen Rechenverfahren lösen lassen, zeigen das Potential der modernen Mathematik auf dem Gebiet der Optimalen Steuerung.

### Beispiele aktueller Forschungsprojekte

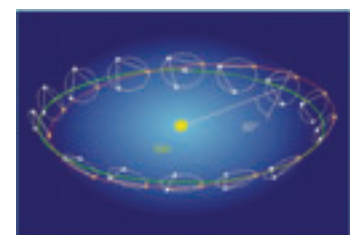
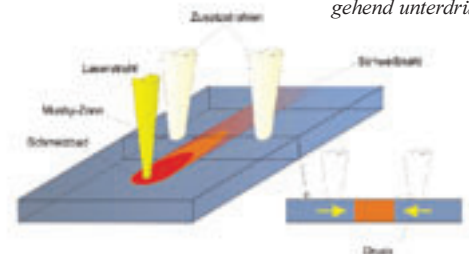
der Arbeitsgruppe sind die Simulation und Optimierung von Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (BMBF-Projekt), die Simulation von modernen Laserstrahlschweißverfahren (KONWIHR-Projekt in Zusammenarbeit mit der Neue Materialien Bayreuth GmbH) und die Optimierung von neuartigen Hochregallagersystemen (Industrieprojekt mit der Krusche Lagertechnik AG). Auf dem Gebiet moderner Schweißverfahren wird die Arbeitsgruppe ab April 2003 für ein Jahr durch Prof. Dr.-Ing. Viktor Karkhin, TU St. Petersburg, im Rahmen einer DAAD-Gastprofessur verstärkt.

### In der Lehre

ist die Arbeitsgruppe verantwortlich für die Numerikausbildung in allen Mathematikstudiengängen, im Diplomstudiengang Physik, im Bachelor-Studiengang Angewandte Informatik und in den ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen. Der Lehrstuhl für Ingenieurmathematik ist verantwortlich für die Mathematikausbildung aller Ingenieurstudiengänge und die Mathe-

matikgrundausbildung für Informatiker. Außerdem beteiligt sich die Arbeitsgruppe an der Ausbildung von Studenten aller Fachrichtungen in höheren Programmiersprachen und im Rahmen der Zusatzqualifikation Multimedia-Kompetenz. Ohne das Engagement aller Mitarbeiter (Dr. Baier, PD Dr. Büskens, PD Dr. Chudej, Dr. Gerds, Dipl.-Math. Knauer, Dipl.-Wirtsch.math. Sternberg, Dipl.-Wirtsch.math. Graf, Dr. Griesse, PD Dr. Zillober) wäre dieses Lehrangebot nicht zu realisieren. ■

*Beim Laserstrahlschweißen kann man durch optimal angepasste Zusatzstrahlen die Ausbildung gefährlicher Heißrisse weitgehend unterdrücken.*



Das ESA-Projekt LISA zur Messung von Gravitationswellen: Niedrig-Schub-Raumfahrzeuge bringen die Satelliten auf optimalen Bahnen ins Ziel.

# Mathematische Statistik

In Forschung und Lehre liefert die Mathematische Statistik die systematische Grundlage für die zahllosen Anwendungen der Statistik. Mathematische Statistik ist daher auch wesentlicher Bestandteil des Studiengangs Wirtschaftsmathematik. Aktuelles Forschungsthema der Arbeitsgruppe Mathematische Statistik ist die theoretische Entwicklung und algorithmische Implementierung robuster statistischer Verfahren für praktisch relevante Modelle.

## Stochastik

Gegenstand der Wahrscheinlichkeitstheorie und Mathematischen Statistik sind stochastische Phänomene, die sich nicht (vollständig) kausal beschreiben lassen, und daher nur Schlüsse mit gewissen Wahrscheinlichkeiten erlauben. Historische Wurzeln sind das Glücksspiel, die Erhebungen für die Zwecke des Staates ('Statistiken'), sowie frühe Auswertungen von Messreihen in Physik und Astronomie, Saat- und Viehzucht. Heute verwendet man stochastische Modellierung überall dort, wo

Entscheidungen unter unvollständiger Information getroffen werden müssen: Wirtschafts-, Ingenieur-, Natur- und empirische Sozialwissenschaften, Linguistik, Biometrie, Finanz- und Versicherungsmathematik, ... . Die Mathematische Stochastik stellt dafür die wissenschaftlichen Begriffe, geeignete Modelle und mathematisch verifizierte Entscheidungsverfahren bereit. Dabei unterscheiden sich Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik durch die Schlussrichtung: vom Modell auf die Beobachtungen, bzw. von den Beobachtungen auf das Modell (Modellparameter).

## Forschung

Die klassischen Verfahren der Statistik sind gegen Modellabweichungen (etwa von der Normalverteilung) extrem instabil. Mit Hilfe erweiterter Verteilungsmodelle leitet daher die Robuste Statistik neue statistische Verfahren her, welche Effizienz und Stabilität vereinen. Dies führt zu robusten Tests und Schätzungen für Regressions-, Zeitreihen-, Zustandsraummodelle, die insbesondere in den Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften eine Rolle spielen.

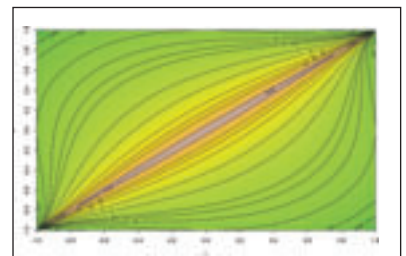
### Ansatz:

Zur Lösung bedarf es vielfältiger mathematischer Methoden, insbesondere asymptotischer Statistik und Optimierungstheorie, die in einer eigenen Monografie (Springer, New York, 2. erw. Auflage in Vorbereitung) entwickelt sind sowie in einer Disser-

tation, die 2002 von der Deutschen Mathematiker-Vereinigung mit dem Förderpreis für Stochastik ausgezeichnet wurde.

### Beispiele, Grafiken:

Zur Illustration der theoretischen Resultate sollen die beigefügten Schaubilder dienen.



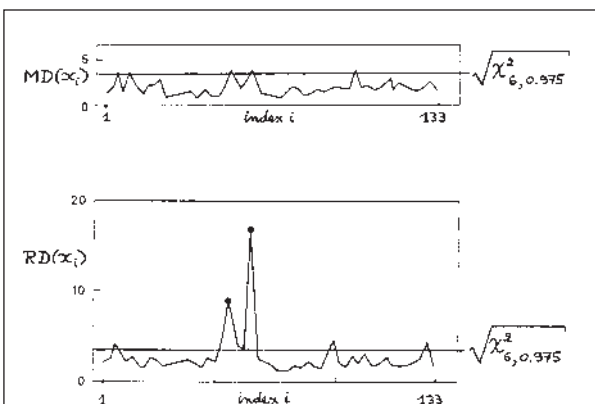
Robuste Informationsschranke in Abhängigkeit von den Parametern eines ARMA(1,1)-Modells bei 5% Kontamination ( $n=100$ ). Das Verhältnis zur klassischen Informationsschranke ist über den gesamten Parameterbereich nahezu konstant 2.1.

### Kooperationen:

Wir stehen in Kontakt mit den Sonderforschungsbereichen "Quantifikation und Simulation ökonomischer Prozesse", HU Berlin, "Komplexitätsreduktion in multivariaten Datenstrukturen", Univ. Dortmund, und sind regelmäßig zu internationalen Tagungen über Robuste Statistik (ICORS) eingeladen. Robuste Verfahren sind in gängigen Programmpaketen implementiert.

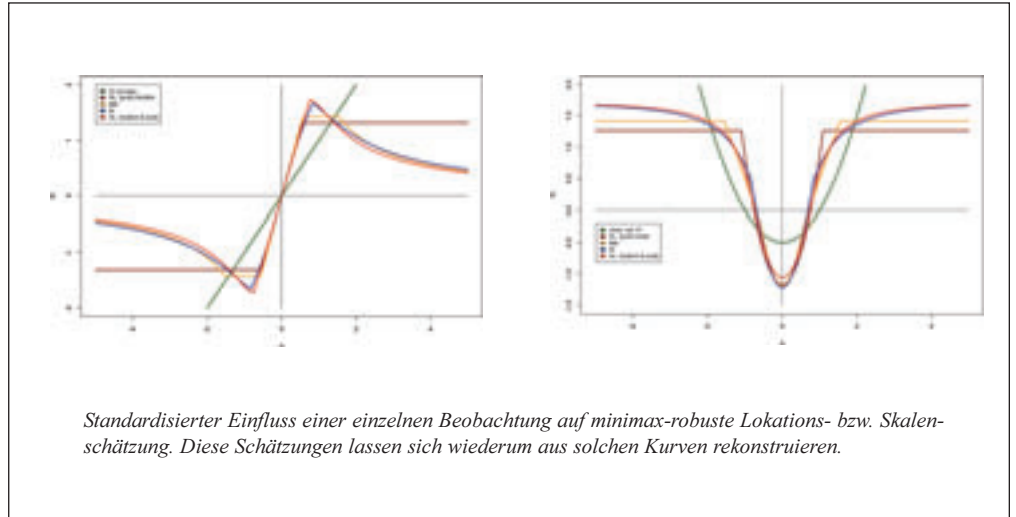
### Lehre

An die Grundvorlesungen Stochastik 1, 2 und Mathematische Statistik 1, 2 schließen Vorlesungen an über Asymptotische Statistik, Semiparametrik, stocha-



Erkennung geologischer Lagerstätten anhand hervorstechender Residuen zu einer robusten Mittelwert- und Kovarianzschätzung (aufgrund von  $n=133$  Konzentrationsmessungen von Cu, Li, Rb, F, As, Sn). Klassische Schätzung (oben) maskiert die Ausreißer durch unauffällige Residuen.

stische Prozesse. Hinzu kommen Vorlesungen in angewandter Statistik: Lineare Modelle, Multivariate Statistik, Zeitreihenanalyse, angew. stochastische Prozesse, nichtparametrische Verfahren, Statistik der Finanzmärkte - gelegentlich mit Übungen eigens für Studenten der Wirtschaftswissenschaften. Ein Statistik-Programmierskurs (Splus, R) wurde eingerichtet. Für die Statistik-Vorlesung anderer Fachbereiche gibt es am Lehrstuhl eine Service-Stelle.



### Statistische Beratung

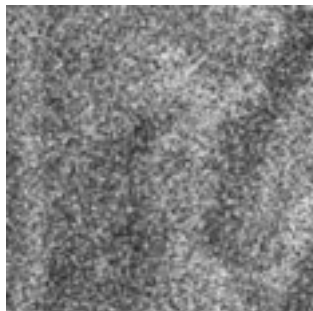
wird von allen Mitgliedern des Lehrstuhls angeboten. Die Fragestellungen (von Biologen, Sportwissenschaftlern, Wirtschaftsstudenten, Linguisten, ...) führen alltäglich auf Modelle und Verfahren, die letztlich nur mit Mathematischer Statistik zu verstehen sind. Wird diese wissenschaftliche Grundlage aufgegeben, gilt: "Trau keiner Statistik, die Du nicht selbst gefälscht hast!".

### Wirtschaftsmathematik

Der seit 1999 vakante Lehrstuhl für Mathematische Statistik wurde nach 5 erfolglosen Berufungsverhandlungen umgewidmet in Wirtschaftsmathematik. Das Kernfach für Wirtschaftsmathematik ist jedoch die Stochastik. ■

### Kontakt:

Lehrstuhl Mathematik VII  
 Universität Bayreuth  
 D-95440 Bayreuth  
 Tel.: 0921 55 3260  
 Fax: 0921 55 2152  
 Ansprechpartner:  
 Prof. Dr. H. Rieder  
 E-Mail: [helmut.rieder@uni-bayreuth.de](mailto:helmut.rieder@uni-bayreuth.de)  
 Internet: [www.uni-bayreuth.de/departments/math/org/mathe7/mathe7.html](http://www.uni-bayreuth.de/departments/math/org/mathe7/mathe7.html)



*Robuster Regressionsschätzer bei der Bildrekonstruktion: Original, durch 50% Gaußsches Rauschen gestörtes Bild, Rekonstruktion aus gestörtem Bild mit robustem Verfahren. Die klassische kleinste Quadrate-Schätzung glättet zu stark und verwischt die Konturen.*



# Mathematik und Didaktik

Zu den Forschungsschwerpunkten des Lehrstuhls für Mathematik und ihre Didaktik gehört die Entwicklung dynamischer Mathematiksoftware sowie von Konzepten für deren Einsatz in der Ausbildung an Schulen und Universitäten. Forschungsvorhaben und Projekte aus dem IuK - Bereich prägten in den letzten Jahren deutlich das Profil des Lehrstuhls.

Um einen Eindruck über die vielfältigen Aktivitäten zu geben, wird im Folgenden eine Auswahl kurz beschrieben. Weitere Informationen finden sich unter <http://did.mat.uni-bayreuth.de>

## GEONExT: Konstruktionsprogramm und Multimediatool

Die Erfahrungen mit dem am Lehrstuhl entwickelten erfolgreichen Geometrieprogramm GEONET bilden die Grundlage des Nachfolgeprogramms GEONExT. Es lässt sich unter verschiedenen Betriebssystemen, wie z.B. Windows und Linux, einsetzen.

GEONExT kann von der Grundschule bis hin zur Analysis der gymnasialen Oberstufe sowie in der Lehrerausbildung an Universitäten vielfältig und flexibel genutzt werden, und zwar als eigenständiges Programm oder im Rahmen von Lernumgebungen auf HTML-Basis. Als eigenständige Anwendung dient GEONExT als Werkzeug zum Durchführen von geometrischen Konstruktionen. Im Unterschied zu Zeichnungen auf Papier lassen sich GEONExT-Konstruktionen nachträglich variieren und dynamisch verändern. Die Integration eines Computer-Algebra-Systems ermöglicht Berechnungen an geometrischen Objekten und schafft interessante Visualisierungsmöglichkeiten. Zusätzlich kann GEONExT in HTML-Seiten eingebunden werden, so dass Texte, Grafiken, Bilder und vor allem bewegliche Konstruktionen miteinander ver-

bunden werden können. Diese Vorgehensweise erlaubt das Erstellen von dynamischen Arbeitsblättern und von komplexeren Lernumgebungen.

Messepräsentationen (Auswahl): CeBIT, SYSTEMS, BayernOnline, Frankfurter Buchmesse, Bildungsmesse.

GEONExT kann ohne Kosten genutzt und (nicht kommerziell) weitergegeben werden. Download und weitere Informationen unter <http://geonext.de>

## Dynamische Lernumgebungen

Es werden dynamische Lernumgebungen entwickelt, die sich u.a. zur Demonstration im Unterricht, zum individuellen Erarbeiten der Lerninhalte und zum eigenständigen Wiederholen eignen. Die Sammlung umfasst neben einer Vielzahl von einzelnen dynamischen Arbeitsblättern auch komplexere Einheiten wie z.B. Goldener Schnitt, Platonische Körper, dynamischer Pythagoras.

## GEONExT goes east

GEONExT und seine Einsatzmöglichkeiten im Unterricht sind insbesondere in Osteuropa auf große Resonanz gestoßen. Neben Tschechien und Bulgarien ist in diesem Zusammenhang vor allem die mehrjährige Zusammenarbeit mit Partnern in der Ukraine zu nennen. Dort werden das Programm und Lernumgebungen in der Praxis eingesetzt und auch weiterentwickelt. Mit der Universität Kiew besteht ein Kooperationsabkommen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem Sprachinterface von GEONExT zu, das es erlaubt, das Menü des Programms an die jeweilige Landessprache anzupassen.

## Experimentelle Mathematik - Konzepte für den Einsatz im Unterricht

Im Rahmen dieses von der ROBERT BOSCH STIFTUNG geförderten Projekts werden Workshops zum Kennenlernen und zum Vertiefen von GEONExT angebo-



ten, in denen auch Unterrichtsmaterialien erstellt und anschließend erprobt werden. Weiterhin finden Projekttag für Schülerinnen und Schüler statt, u.a. in Zusammenarbeit mit der Humboldt Universität Berlin.

### Multimediapartnerschaft mit Schulen

In diesem Projekt geht es um die Konzeption und die Pflege von Computernetzwerken in Schulen, wobei wir wiederum von der ROBERT BOSCH STIFTUNG und dem Bayerischen Staatsministerium für Unterricht und Kultus unterstützt werden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die systematische Weiterbildung der Systembetreuer, wobei auch interessierte Oberstufenschüler eingebunden sind.

### Math-kit

Math-kit ist ein multimedialer Baukasten, der abgeschlossene Studieneinheiten für die Mathematikausbildung im Grundstudium enthält. Partner in diesem BMBF-Projekt sind die Universitäten Hagen, Hamburg und Paderborn. Zu den Bayreuther Aufgaben gehört insbesondere die Evaluation der Studieneinheiten an den beteiligten Universitäten.

### Mathematikaufgaben-Datenbank SMART

Diese elektronische Aufgabendatenbank enthält derzeit ca. 2600 Mathematikaufgaben mit Lösungen für die Jahrgangsstufen 5 bis 11 des Gymnasiums. Besonderer Wert wird gelegt auf Problemlöseaufgaben sowie auf variierende Fragestellungen. Arbeitsblätter mit Aufgaben aus SMART lassen sich interaktiv zusammenstellen, sind online editierbar und können in unterschiedlichen Formaten (z.B. PDF oder GIF) erzeugt werden. Eine entsprechende Datenbank mit Aufgaben für Realschulen ist im Entstehen (<http://did.mat.uni-bayreuth.de/smart>).

### Modellversuch der Bundesländer-Kommission

Die inhaltlichen Schwerpunkte des BLK-Modellversuchs "Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts" sind in elf Modulen beschrieben. Dazu gehören u.a. 'Weiterentwicklung der Aufgabenkultur', 'Aus Fehlern lernen', 'Verständnisvolles Lernen auf unterschiedlichen Niveaus', 'Zuwachs von Kompetenz erfahrbar machen' und 'Verantwortung für das eigene Lernen stärken'. Eine Auflistung und Erläuterungen aller Module sowie weitere Informationen und Materialien zu dem Modellversuch, an dem 180 Schulen aus 15 Bundesländern beteiligt sind, finden sich auf dem zentralen Server unter <http://blk.mat.uni-bayreuth.de>. Die wissenschaftliche Leitung im Bereich Mathematik innerhalb des Schulversuchs sowie Aufbau und Pflege des zentralen Servers erfolgen durch unseren Lehrstuhl. Programmträger ist das IPN der Universität Kiel.

### Das Z-MNU

Das neu errichtete Zentrum zur Förderung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts (Z-MNU) vereint als zentrale Einrichtung der Universität Bayreuth die Fachdidaktiken der einzelnen Naturwissenschaften sowie der Mathematik und Informatik mit den zugehörigen Fachdisziplinen in Kooperation mit der Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften und der Pädagogik. (<http://zmnu.uni-bayreuth.de>) Gemeinsam mit Lehrkräften wird u.a. an der inhaltlichen und methodischen Weiterentwicklung des Mathematikunterrichts gearbeitet, schulinterne Entwicklungsprozesse werden über einen längeren Zeitraum begleitet. Dabei kommt es auch zum Einsatz videogestützter Unterrichtsanalysen als neuartiges Werkzeug zur Lehrerfortbildung. Partner bei den Videostudien ist die Universität Zürich.

### Zusatzqualifikation Multimediaalkompetenz

Seit dem WS 1998/99 gibt es für Studierende aller Fachrichtungen das Angebot der Zusatzqualifikation Multimediaalkompetenz. Inhalt sind die Kommunikations- und Informationstechnologien am Beispiel des Internet. Der Umfang der Ausbildung beträgt insgesamt 20 Semesterwochenstunden, untergliedert in einen jeweils zweisemestrigen Grund- und Fortsetzungskurs. Detaillierte Informationen zu den Inhalten unter <http://did.mat.uni-bayreuth.de>



Die Zusatzqualifikation ist außerdem integriert in das Nebenfach "Informationswissenschaft (Neue Medien)", das in etlichen BA-Studiengängen der Fakultäten IV und V angeboten wird.

### Virtuelle Hochschule Bayern

Innerhalb der Fächergruppe Schlüsselqualifikationen beteiligt sich der Lehrstuhl auf der organisatorischen und der inhaltlichen Ebene an der Virtuellen Hochschule Bayern. Das bereits bestehende Angebot Grundlagen der WWW-Nutzung und WWW-Programmierung soll durch weitere Veranstaltungen aus dem Multimedia-Bereich ergänzt werden (<http://www.vhb.org>). ■

# Was ist Physik?

Die Physik ist grundlegende Naturwissenschaft, Teil unserer Kultur und Grundlage der Technik.

Markus Schwoerer

Das Ziel physikalischer Forschung ist es, das Geschehen in Natur und Technik zu erkennen und verständlich zu machen, die Vorgänge auf allgemein gültige Gesetze - die Naturgesetze - zurückzuführen. Die Naturgesetze lehren uns: Die Welt hat eine innere Ordnung. Diese Ordnung ist, soweit wir sie bisher erkannt haben, von übergeordneter Gültigkeit, nichts kann sich ihr entziehen. Während alles Materielle in dieser Welt ständigem naturgesetzlichem Wandel unterworfen ist, ist die naturgesetzliche Ordnung nach unserem besten Wissen zeitlos, jenseits zeitlichen Wandels. Es sind die Naturgesetze, die das Beständige in unserer Welt darstellen. Menschlichen Eingriffen sind sie vollkommen entzogen, sie sind unantastbar. Verletzungen der Naturgesetze scheint es nicht zu geben, wie wild auch immer materielle Prozesse im

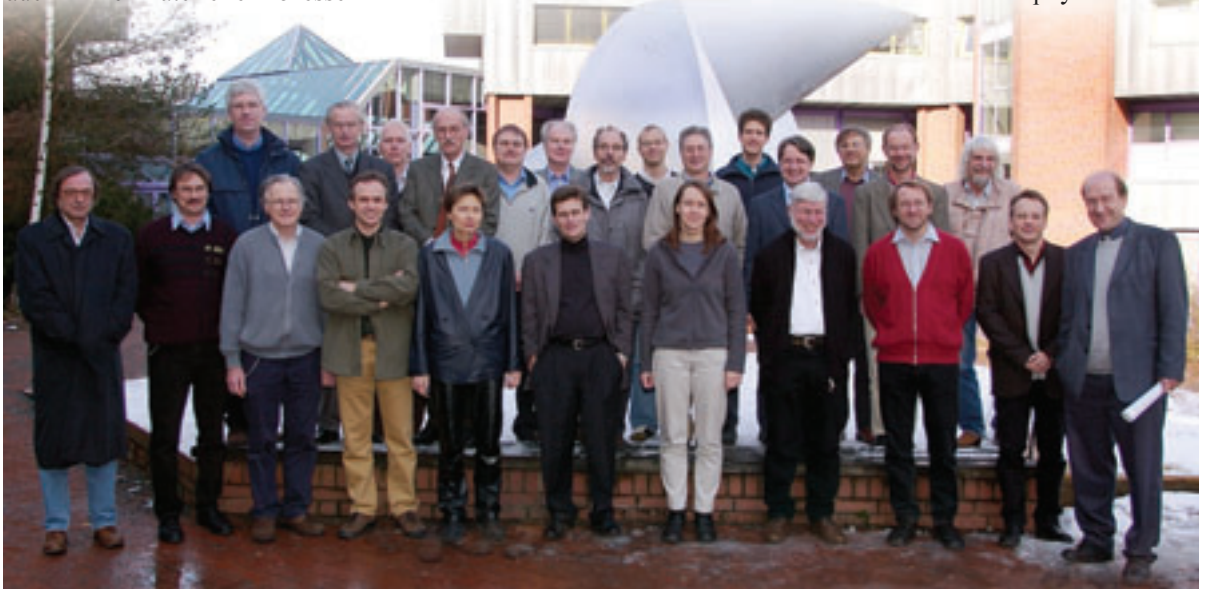
Kosmos sich austoben oder Krieg und Terror in unserem irdischen Bereich sich gebärden. Wir können der naturgesetzlichen Ordnung an jedem Ort und zu jeder Zeit unser volles Vertrauen schenken. Wir müssen in allem, was wir tun und planen, auf dieser Ordnung aufbauen. Das ist die Botschaft.

Physikalisches Forschen ist faszinierend und zutiefst befriedigend. Etwas zu verstehen oder zu entdecken, ist ebenso ein Urtrieb wie alles künstlerische Gestalten. Es lässt sich nicht einschränken, unterdrücken oder verbieten. Das Spannungsfeld zwischen Neugierde und Freude, aber auch zwischen enttäuschendem Scheitern und Erfolg, ist eine den Forscher in seinen Bann ziehende starke emotionale Triebfeder. Die rationale Motivation liegt darin, aus neuen Einsichten neue Gestaltungsmöglichkeiten zu gewinnen und damit den Menschen und der Gesellschaft zu dienen. Denn einerseits

ermöglicht physikalische Forschung, die Welt besser zu verstehen und neue Vorstellungen von der Welt zu gewinnen, andererseits erlaubt sie uns, neue Techniken zu entwickeln. Mit der Technik hat sich der Mensch seine tägliche Arbeit erleichtert, sie hat ihm ein erträglicheres und lebenswerteres Leben ermöglicht. Wir müssen uns allerdings dessen bewusst sein, dass die Technik auch zu Tod und Vernichtung missbraucht werden kann und bis in die jüngste Zeit in Kriegen und Terroranschlägen missbraucht worden ist.

Die Wurzeln der Physik liegen in der Antike. Aber erst im 17. Jahrhundert haben Johannes Kepler, Galileo Galilei und Isaac Newton die Methodik der modernen Physik dadurch begründet, dass sie einzelne Vorgänge in der Natur aus ihrem Zusammenhang herauslösten und mit Hilfe von Experimenten quantitativ untersuchten und dass sie schließlich ein physikalisches

Von links nach rechts:  
vordere Reihe: Prof. Dr. Jürgen Küppers, Prof. Dr. Jürgen Köhler, Prof. Dr. Harald Pascher, Prof. Dr. Werner Köhler, Dr. Sigrüd Weber, Prof. Dr. Ernst Rößler, Dr. Dagmar Klostermeier, Prof. Dr. Franz Georg Mertens, Prof. Dr. Ingo Rehberg, Prof. Dr. Albrecht Ott, Prof. Dr. Helmut Büttner;  
hintere Reihe: Prof. Dr. Sander van Smaalen, Prof. Dr. Jürgen Kalus, Prof. Dr. Helmut Brand, Prof. Dr. Markus Schwoerer, Dr. Wolfgang Richter, Prof. Dr. Alois Seilmeier, Prof. Dr. Lorenz Kramer; Priv.-Doz. Dr. Frank Göhmann, Prof. Dr. Dierk Rainer, Dr. Cord Müller, Prof. Dr. Hans Braun, Prof. Dr. Hans Schamel, Prof. Dr. Lothar Kador, Prof. Dr. Georg Eska  
Es fehlen: Prof. Dr. Dietrich Haarer, Prof. Dr. Werner Pesch, Prof. Dr. F. Busse  
(Foto: Peter Kolb)





Gesetz mathematisch formulierten, mit dem sie so unterschiedliche Vorgänge wie den freien Fall, die Bewegung der Planeten und das Schwingen eines Pendels verstehen konnten: Die Kraft zwischen den jeweils beteiligten Körpern - zwischen dem frei fallenden Körper und der Erde, zwischen der Sonne und einem Planeten und zwischen dem Pendel und der Erde - ist immer die Gravitation. Sie ist anziehend und proportional zum Produkt der beiden beteiligten Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ihrer Schwerpunkte. Am Ende des 19. Jahrhunderts begannen die Physiker, die elektronische Struktur der Materie aufzuklären. Dadurch wurde es erst möglich, das Wesen der Röntgenstrahlen und der von Henri Becquerel, Marie Curie und Pierre Curie entdeckten natürlichen Radioaktivität zu verstehen. Joseph Thomson entdeckte 1897 das Elektron und damit das erste unteilbare Teilchen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts revolutionierte Albert Einstein mit der von ihm entwickelten Relativitätstheorie unsere Vorstellungen von Raum und Zeit. Er und Max Planck haben das Photon als Elementarteilchen des Lichts entdeckt. Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac und Wolfgang Pauli haben mit der Entwicklung der Quantentheorie das Problem des Welle-Teilchen-Dualismus nicht nur des Lichts, sondern aller Teilchen formuliert: Zwischen dem Impuls  $p$  der Teilchen und der Wellenlänge  $\lambda$  der Welle gilt die berühmte de Broglie-Beziehung  $p=h/\lambda$ ; dabei ist das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  eine Naturkonstante, die eine ebenso fundamentale Bedeutung besitzt wie etwa die Elementarladung  $e$  des Elektrons, die Lichtgeschwindigkeit  $c$  oder die Boltzmann-Konstante  $k$ . Aus der Quantentheorie haben wir gelernt, dass und wie unsere gewohnten Vorstellungen von Kausalität und Determinismus in der Mikrowelt "unscharf" werden. Diese Entdeckungen waren der

Beginn der modernen Physik des 20. Jahrhunderts. Seither entdecken die Physiker immer neue, aufregende Phänomene und Naturgesetze. Auch in der Makrowelt sind Kausalität und Determinismus unscharf. Das lehrt uns die Nichtlineare Dynamik. Sie ist einer der physikalischen Forschungsschwerpunkte an der Universität Bayreuth und Inhalt der Arbeiten der Professoren Busse (i.R.), Kramer, Pesch, Rehberg und Schamel. Die Einsicht, dass trotz strenger Naturgesetze vieles Wichtige in der Welt nicht vorhersagbar ist, ist eine der wesentlichen jüngeren Erkenntnisse der Physik.

Die Entdeckungen und Einsichten der Physiker und die darauf aufbauenden Anwendungen haben unser Weltbild in einem Ausmaß geprägt, das man nur überblickt, wenn man sich in Gedanken in eine vergangene Epoche zurück versetzt. Ein Jahrhundert genügt schon. Noch vor 100 Jahren galt nicht einmal die Existenz der Atome als gesichert. Die Physik hat uns seither ein Bild von der Struktur und der Dynamik unserer Welt vermittelt, das die menschliche Vorstellungskraft oft übersteigt, aber zugleich durch Experimente gesichert ist und immer besser verstanden wird. Es reicht vom Kleinsten bis zum Größten, vom Leichtesten bis zum Schwersten, vom Langsamsten bis zum Schnellsten, vom Kältesten bis zum Heißesten, vom Hellsten bis zum Dunkelsten, von der dünnsten bis zur dichtesten Materie und vom Anfang des Universums bis heute. Dazwischen liegen jeweils 20 oder mehr Größenordnungen in den jeweiligen Dimensionen. Vieles an diesem grandiosen Bild beruht auf Extrapolationen vom Bekannten ins Unerforschte, manches auf kühnen Hypothesen. Davon lebt alle Wissenschaft. Kolumbus glaubte an die Hypothese, dass die Welt rund sei, und dass er deshalb Indien zur See erreichen könne. Dieser Glaube hat ihm Tatkraft verliehen. Indien erreichte er zwar nicht, aber er hat Amerika ent-

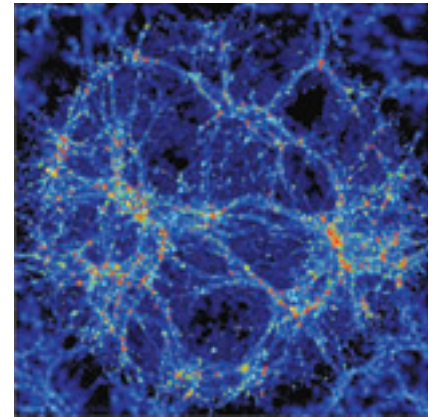
deckt. Auch die Forschungsobjekte der Physik liegen oft zunächst weit außerhalb des für uns unmittelbar Erfahrbaren.

Aber früher oder später betreffen uns fundamentale naturwissenschaftliche Entdeckungen ebenso direkt wie die Entdeckung Amerikas. Die Physik ist die grundlegend-

ste aller Naturwissenschaften. Sie ist ein prägender Teil unserer Kultur.

Die Physik hat auch einen vielfältigen und oft entscheidenden Einfluss auf andere Disziplinen: Apparative Entwicklungen sowie experimentelle und theoretische Methoden der Physik bilden die Grundlage für viele andere Wissenschaften und deren Siegeszug. Dazu war und ist eine enge Zusammenarbeit zwischen der Physik und ihren Nachbarwissenschaften notwendig. Die Kooperation der Bayreuther Physikprofessoren Brand, Kador, Kalus (em.), Werner Köhler, Haarer und Schwoerer mit Bayreuther Professoren der Chemie auf dem Gebiet der Makromolekülforschung ist ein markantes Beispiel dafür. Sie hat eine lange und erfolgreiche Tradition. Die Makromolekülforschung ist - ebenso wie in der Chemie - ein weiterer Forschungsschwerpunkt der Physik an der Universität Bayreuth.

Die physikalische Forschung bildet ein unverzichtbares Element vor allem der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen. Sie war in der Vergangenheit und ist bis heute die Grundlage der Wirtschaft, die auf moderner Technik gründet. Entscheidende technologische Durchbrüche beruhen oft auf Ergebnissen solcher physikalischer Forschung, deren ursprüngliches Ziel gar nicht die



*Das Ergebnis einer Simulation der Materieentwicklung im Kosmos. Die Kantenlänge des Kubus ist 1,2 Mrd. Lichtjahre. Die hellen Strukturen sind die durch die Gravitationskraft gebildeten Materiekonzentrationen, die farbigen Punkte sind Galaxien. Man erkennt deutlich, dass sich Galaxienhaufen gebildet haben. (MPI für Astrophysik, Garching)*

Anwendung war. Die umwälzenden technischen Entwicklungen im 20. Jahrhundert sind immer aus der engen Verbindung von Grundlagenforschung und der Entwicklung neuer experimenteller und theoretischer Methoden entstanden. Die meisten davon waren physikalischer Art. Eine einseitige Ausrichtung der gesamten naturwissenschaftlichen und insbesondere der physikalischen Forschung auf technische Anwendung, Marktorientierung und Interdisziplinarität würde daher auf Dauer zu irreparablen Schäden führen. Deshalb muss der freien Entwicklung langfristiger gesicherter Grundlagenforschung eine hohe Priorität eingeräumt werden. An der Universität Bayreuth ist diese Forderung mit der gezielten Einrichtung mehrerer Forschungsschwerpunkte in hervorragendem Maße erfüllt.

Auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts forschen Physiker an grundlegenden Problemen der Physik, der Chemie und der Technik und, in zunehmendem Maße, auch der Biologie. Deshalb hat die Universität Bayreuth vor kurzem die beiden Physikprofessoren Albrecht Ott und Jürgen Köhler berufen. Mit der Biophysik bilden sie einen dritten physikalischen Forschungsschwerpunkt und gemeinsam mit Professoren der Biologie und der Chemie wurde die Studienrichtung Biophysik eingerichtet. Die ersten Bayreuther Studenten haben ihr Biophysik-Studium vor kurzem begonnen.

Die offenen Felder spannender physikalischer Forschung der Zukunft sind vielfältig und in ständigem Wandel. Dazu gehört auch der vierte physikalische Forschungsschwerpunkt an der Universität Bayreuth, die Festkörperphysik mit ihren unübersehbar großen technischen Anwendungen der

Mikroelektronik, der Optik und der Tieftemperaturphysik. Die Professoren Braun, Büttner, Eska, Küppers, Mertens, Pascher, Rainer, Rößler, Seilmeier und van Smaalen forschen alle auf aktuellen Gebieten der experimentellen und der theoretischen Festkörperphysik.

Physik ist quicklebendig. Sie war und wird auch künftig grundlegende Naturwissenschaft, Teil unserer Kultur und Grundlage unserer Technik sein.

**Physik ist unverzichtbar und muss wesentlicher Teil unserer Allgemeinbildung sein.**

Naturwissenschaften und Technik haben in Deutschland einen hohen Stand. Nur wenn unser Land auch künftig an der vordersten Front der Naturwissenschaften und ihrer Anwendungen tätig ist, wird es im globalen Wettbewerb bestehen und den Lebensstandard der Bevölkerung sichern können.

Für viele nichtphysikalische Disziplinen (z. B. Chemie, Biologie, Medizin, Technik- und Ingenieurwissenschaften) sind solide physikalische Grundkenntnisse unabdingbar. Auch für z.B. die Fächer Philosophie und Wirtschafts- und Finanzwissenschaften ist die Kenntnis physikalischer Arbeitsweisen und Begriffsbildungen von grundsätzlicher Bedeutung.

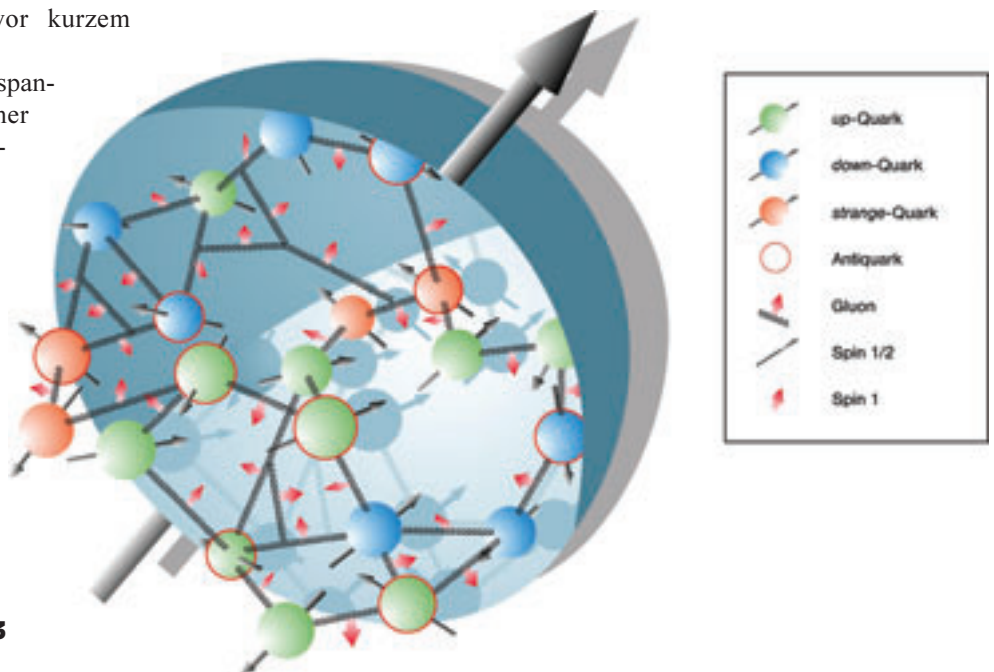
Wir halten es daher für unverzichtbar, dass Grundkenntnisse

von der Natur und Grundeinsichten in das Geschehen in der Natur in angemessener Form einem weiten Bevölkerungskreis angeboten und vermittelt werden. Dies ist in erster Linie Aufgabe von Schulen, Fachhochschulen und Universitäten, es ist im weiteren Sinne aber auch Aufgabe aller mit Erziehungsaufgaben betrauten Einrichtungen, aller Institutionen, die berufen sind, zur Gestaltung unseres Lebens beizutragen.

Jeder Schüler sollte erfahren, dass unser gesamtes Wissen Ergebnis von Forschung ist und dass nur dieses Wissen die Menschen in die Lage versetzt, aktiv an der Gestaltung ihrer Zukunft mitzuwirken.

Auch politische Entscheidungen über Umfang und Prioritäten der Forschungsförderung sowie der Förderung und Bewertung großer technischer Projekte setzen eine solide Schulbildung in der Physik, der für die Technik grundlegenden Wissenschaft, voraus. Diese Entscheidungen müssen der gesamten Bevölkerung vermittelt, von ihr verstanden und getragen werden. Auch dafür ist eine entsprechende Schulbildung in der Physik notwendig. Deshalb müssen die Erkenntnisse der Naturwissenschaften als Teil der Kultur ebenso selbstverständlich zur Allgemeinbildung gehören wie die großen Werke der Dichter, Philosophen und Künstler.

*Bild vom Inneren eines Protons. Die drei Quarks des Protons, zwei up- und ein down-Quark, schwimmen in einem ganzen "See" aus sog. virtuellen Quarks und Anti-quarks, in die sich Gluonen, die Feldteilchen der starken Kraft (als Federn dargestellt), für kurze Zeit verwandeln. Dazu kommen noch strange-Quarks und deren Anti-quarks. Alle Teilchen tragen ihren eigenen Drehimpuls, den Spin. Dazu entsteht durch die Bewegung der Teilchen ein Bahndrehimpuls, der zum Gesamtspin des Protons beiträgt. (DESY, Hamburg)*





## Physik ist international

Die Physik kennt keine nationalen, politischen oder weltanschaulichen Grenzen. Ihre Gesetze sind global und universell gültig und mit Hilfe der Mathematik in einer Sprache formuliert, die jede Physikerin und jeder Physiker kennt oder lernen kann, unabhängig davon, auf welchem Erdteil oder in welchem Land sie leben oder studiert haben. Die experimentellen Ergebnisse und die theoretischen Methoden der physikalischen Grundlagen sind öffentlich.

Alle Versuche, die Physik zu nationalisieren, haben sich als Irrwege erwiesen. Z. B. haben Physiker um die Nobelpreisträger Philipp Lenard und Johannes Stark mit der "Deutschen Physik" zwar nationalpolitische Wirkungen erzielt, aber die von ihnen unterstützte, schändliche Vertreibung hervorragender jüdischer Physiker unter der Herrschaft der Nationalsozialisten hat der Wissenschaft, der Kultur und der Technik in Deutschland zutiefst geschadet.

Die Internationalität der Naturwissenschaften leistet einen wichtigen Beitrag zur Stärkung des internationalen Friedens. Die Öffnung unserer Grenzen für internationale Zusammenarbeit und für gemeinsame internationale physikalische Forschungsprojekte in unserem Lande ist ebenso notwendig wie die Erfahrungen deutscher Wissenschaftler im Ausland, um den wissenschaftlichen Fortschritt und einen hohen Standard moderner Technik zu sichern. An drei charakteristischen Beispielen soll im Folgenden skizziert werden, wie die Internationalität im täglichen Forschungsbetrieb weltweit und auch an der Universität Bayreuth praktiziert wird.

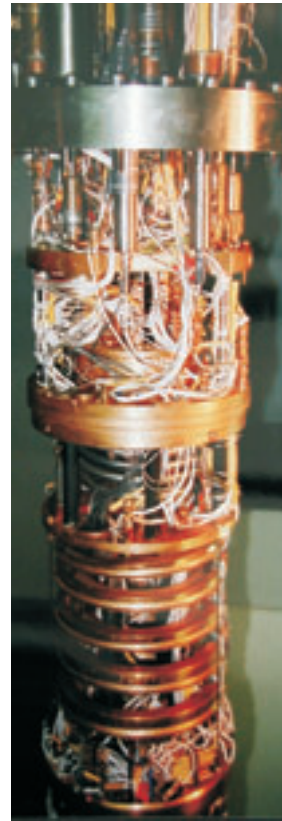
**Auslandsaufenthalte:** Junge diplomierte oder promovierte Physiker müssen ihren wissenschaftlichen Horizont, den sie sich an ihrer Heimatuniversität erworben haben, beträchtlich erweitern, wenn sie eine eigenständige Tätigkeit in der Grundlagenforschung

oder in einem anwendungsorientierten Beruf anstreben. Ein ein- bis zweijähriger Forschungsaufenthalt an einer physikalischen Forschungsstätte im Ausland ist dafür ein sehr geeigneter Weg. Die Wirkung eines solchen Auslandsaufenthaltes auf die internationale Zusammenarbeit kann nicht hoch genug eingeschätzt werden - in wissenschaftlicher wie auch in menschlicher Hinsicht. Der Postdoktorand exportiert dabei Wissen aus seiner Heimatuniversität und importiert bei seiner Rückkehr Know-How aus seinem Gastinstitut. Viele Bayreuther Absolventen, die nach einem Auslandsaufenthalt zurück nach Deutschland kamen, arbeiten heute an ausgezeichneten Stellen in Universitäten, in staatlichen Forschungsinstituten, in der produzierenden Industrie oder in dienstleistenden Firmen. Die nicht unbeträchtliche Gefahr, dass gerade die besten deutschen Physiker nicht wieder nach Deutschland zurückkehren, sollte dabei nicht unterschätzt werden. Sie darf aber kein Hinderungsgrund sein, denn oft erleichtert oder ermöglicht es gerade ein Auslandsaufenthalt jungen Physikern, selbständige Erfolge zu erzielen. Der "Gefahr", dass hervorragende junge Wissenschaftler ins Ausland abwandern, lässt sich nur dadurch begegnen, dass auch in Deutschland die Bedingungen für Spitzenforscher, bis hin zur Besoldungsstruktur, deutlich attraktiver gestaltet werden.

**Gastwissenschaftler:** Die Stätten physikalischer Forschung profitieren von Gastwissenschaftlern aus aller Welt, nicht nur im Bereich der großen Experimente, sondern auch in allen anderen Forschungsgruppen. In den deutschen Universitäten spielt dabei die Alexander von Humboldt-Stiftung eine herausragende und weltweit hoch geachtete Rolle. Sie fördert die Tätigkeit der Humboldt-Forschungspreisträgerinnen und -preisträger und der Humboldt-Forschungsstipendiatinnen und -stipendiaten in vorbildlicher Weise, denn sie finanziert sorgfältig und nach

strengen Maßstäben ausgewählten, oft weltbekannten Wissenschaftlern den Aufenthalt in Deutschland und pflegt zudem den Kontakt zwischen den Gästen und den Gastgebern im Anschluss an den Gastaufenthalt. Jeder fünfte für den Humboldt-Forschungspreis vorgeschlagene Wissenschaftler seit Bestehen des Programms (1972) war ein Physiker. Die Universität Bayreuth ist sehr erfolgreich bei der Bewilligung der begehrten Forschungspreise durch die Alexander von Humboldt-Stiftung. Bezogen auf die Zahl der Professoren, steht sie seit einigen Jahren mit an der Spitze der deutschen Universitäten. Die Physik hat daran einen beträchtlichen Anteil. Viele unserer mehr als zwölf Humboldt-Forschungspreisträger und Stipendiaten - Physiker aus USA, Frankreich, Russland, Japan, England und anderen Ländern - kamen wiederholt oder blieben für ein halbes oder teilweise auch für ein ganzes Jahr. Offenbar schätzen sie ihre Kollegen und ihre Forschungsbedingungen an der Universität Bayreuth.

Auch viele andere Forschungsförderer unterstützen uns bei der Finanzierung ausländischer Gäste: Zahlreiche ausländische Gastwissenschaftler arbeiten im Rahmen



*Doktoranden bei der Arbeit: Sie bereiten eine Apparatur vor, mit der Temperaturen von wenigen Millionstel Kelvin erreicht werden können. Der wichtigste Bestandteil der Apparatur ist 20kg reines Kupfer. Eine Platinprobe wurde in früheren Experimenten auf  $1,5\mu\text{K}$  abgekühlt - die bislang tiefste Temperatur für einen Festkörper im thermischen Gleichgewicht. (F.Pobell, Universität Bayreuth)*





von Förderungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Normalverfahren, Sonderforschungsbe-  
reichen, Schwerpunktsprogrammen,  
usw), im Rahmen eines europäi-  
schen Graduiertenkollegs, an  
Schwerpunktprogrammen des  
Bundesministeriums für Forschung  
und Technologie (BMBF) und der  
Volkswagenstiftung, in mehreren  
EU-Netzwerken, in einem bayeri-  
schen Langfristprogramm und in  
Programmen anderer Drittmittel-  
geber. Unser nicht unbeträchtlicher  
Aufwand zur Einwerbung der  
finanziellen Mittel für unsere  
Gäste lohnt sich: Zur Zeit (Ende  
2002/Anfang 2003) forschen im  
Bereich der Physik an der  
Universität Bayreuth mehr als 50  
Gastwissenschaftler aus 23 Län-  
dern, davon allein acht aus Russ-  
land, sieben aus der Ukraine und je  
fünf aus Rumänien und Indien.  
Ihre Aufenthaltsdauer beträgt zwi-  
schen zwei Wochen und drei  
Jahren, bisweilen sogar noch län-  
ger. Einige der Gäste nutzen für  
kurze Zeit oder wiederholt spezifi-  
sche Forschungseinrichtungen, die  
an ihrer Heimatinstitution oder  
anderswo nicht gegeben sind oder  
sie diskutieren spezielle physikali-  
sche Probleme mit ihren Bayreu-  
ther Kollegen. Andere - insbeson-  
dere junge Physiker - promovieren  
hier. Zurzeit sind in der Physik an  
der Universität Bayreuth 20  
Doktoranden und 16 Postdokto-  
randen aus dem Ausland.

**Große Experimente**, etwa in der  
Astrophysik, der Teilchenphysik,  
der Kernphysik oder der Fusions-  
forschung können schon aus finan-  
ziellen Gründen nicht im nationa-  
len Alleingang durchgeführt wer-  
den. Auch aus politischen Gründen  
wäre dies unklug. Die Fusionsfor-  
schung hat langfristig das Ziel, die  
Kernfusion in einem technischen  
Prozess kontrolliert zur Energie-  
versorgung zu nutzen. In der Sonne  
findet die Kernfusion kontinuier-  
lich statt und sorgt dafür, dass sie  
ständig strahlt und damit die Erde  
mit Primärenergie versorgt. Das  
Ziel der kontrollierten Kernfusion  
wird weltweit von wenigen Groß-  
forschungsanlagen gemeinsam  
verfolgt. Das Max-Planck-Institut  
für Plasmaforschung (IPP) in  
Garching ist eine dieser Groß-  
forschungsanlagen. Der Inhaber  
des Lehrstuhls Experimentalphysik  
III, Professor Küppers, ist gleich-  
zeitig Mitglied im Direktorium des  
IPP und erforscht an der Univer-  
sität Bayreuth mit Methoden der  
Oberflächenphysik die Grundlagen  
der Wechselwirkung zwischen dem  
extrem heißen Plasma und den  
Wänden der Fusionsreaktoren mit  
dem Ziel, die Zerstörung dieser  
Wände durch die Strahlung des  
Plasmas zu verhindern. ■

## Physikalisches Kolloquium

An jedem Dienstag während  
der Vorlesungszeiten findet  
um 18 Uhr das Physikalisches  
Kolloquium statt. Als Redner-  
in oder Redner ist jedes Mal  
eine renommierte Physikerin  
oder ein renommierter Phy-  
siker aus dem In- oder manch-  
mal auch aus dem Ausland  
eingeladen. Hörer und Dis-  
kussionsteilnehmer sind die  
Professoren, die wissenschaft-  
lichen Mitarbeiter und die  
Studenten der Physik, aber  
bisweilen auch Gäste aus  
anderen Fakultäten oder aus  
der Bevölkerung. Das Kollo-  
quium ist öffentlich und dient  
vor allem der physikalischen  
Allgemeinbildung, aber auch  
der Pflege des Kontakts und  
der Zusammenarbeit mit aus-  
wärtigen Kollegen. Seit der  
Gründung der Universität  
Bayreuth haben etwa 650  
Physikalische Kolloquien  
stattgefunden.

*Dieses Kapitel enthält Auszüge aus:*

*Physik - Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung: Denkschrift zum  
Jahr der Physik: ein Bericht an Gesellschaft, Politik und Industrie Hrsg. Deutsche Physi-  
kalische Gesellschaft, Markus Schwoerer ... - Bad Honnef, ISBN 3-00-006876-7, 10,- €*



# Absolventen

Markus Schwoerer

Seit dem Studienjahr 1989/90 sind im Durchschnitt pro Jahr 36 Bayreuther Physikstudenten Diplomphysiker geworden. Im gleichen Zeitraum wurden im Durchschnitt pro Jahr 22 Bayreuther Physiker zum Dr. rer. nat. promoviert (siehe Diagramm). 20 Physiker wurden seit 1989 in den Fächern Experimentalphysik oder Theoretische Physik an der UBT habilitiert. Außerdem haben zahlreiche Studenten ihr erstes Staatsexamen für das Lehramt in den Fächern Mathematik und Physik bestanden und sind inzwischen Studienräte, Oberstudienräte oder Studiendirektoren an Gymnasien.

Was ist aus den mehr als 600 ehemaligen Bayreuther Physikern geworden? Das Spektrum der Berufe, in denen Physiker tätig sind, ist sehr breit.

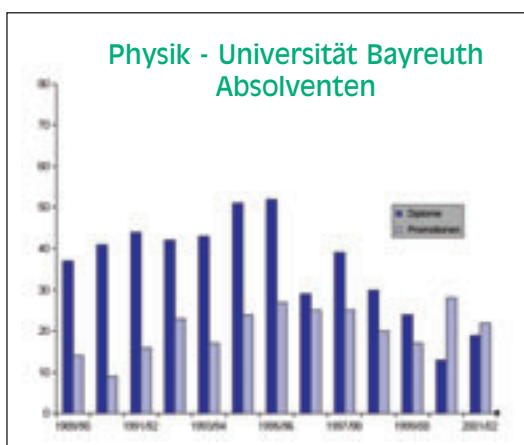
Man findet Physiker in fast allen Zweigen moderner Industrie, in dienstleistenden Wirtschaftsbranchen und natürlich in Universitäten und außeruniversitären Forschungslaboratorien. Man findet sie bevorzugt dort, wo neue Methoden, Techniken oder Materialien entwickelt werden, wo neue Fragestellungen präzisiert oder Lösungs-

wege gefunden und analysiert werden sollen, also überall dort, wo zielgerichtete Erneuerung und Erkenntnisgewinn die primären Aufgaben sind. Der Physiker lernt meist lebenslang Neues: Das ist der Reiz an seinem Beruf.

Natürlich ist es nicht möglich, die Berufe der ehemaligen Bayreuther Physiker auch nur annähernd erschöpfend aufzulisten. 18 ehemalige Bayreuther Physiker sind Universitätsprofessoren geworden, davon acht auf einer C4-Stelle, zwei auf einer full-professor-Stelle in den USA, vier auf einer C3-Stelle und vier auf einer entsprechenden Stelle im Ausland. Außerdem sind zehn ehemalige Bayreuther Physiker Fachhochschulprofessoren geworden. Die folgende Liste von Berufen unserer Absolventen ist exemplarisch und unvollständig. Sie soll nur einen Eindruck vermitteln. Viele Absolventen haben wir auch aus den Augen verloren. Obwohl die Konjunktur in den vergangenen zwei Dekaden starken Schwankungen ausgesetzt war, sind uns längerfristig arbeitslose Absolventen nicht bekannt. Das Studium der Physik ist anspruchsvoll, aber es lohnt sich! ■

## Typische Berufe ehemaliger Bayreuther Physiker

- Leiter der Abteilung Physik und Polymercharakterisierung in einem großen Chemiekonzern (D)
- Manager für Display-Technologie bei einem Weltkonzern (CH)
- Forschung "electronic materials" bei einem Weltkonzern (USA)
- Zahlreiche Software-Entwickler in Unternehmen und selbständig (D, USA)
- Wissenschaftler am Europäischen Patentamt
- Zahlreiche Patentanwälte in Firmen oder Kanzleien
- Zahlreiche Wissenschaftler in staatlichen Forschungsinstituten (D, EU und USA)
- Coordinador científico Centro Nacional de Metrologia, Mexico
- Projektleiter Kfz-Elektronik in einem Weltkonzern (D)
- Manager New Business in einem Weltkonzern
- Senior Engineer in einem Weltkonzern
- Gruppenleiter Zentrale Forschung bei einem Elektronikonzern
- Netzwerkentwickler Telekommunikation
- Mitarbeiter in Unternehmensberatungsfirmen
- Bereichsleiter in einem Universitätsrechenzentrum
- Wissenschaftler in einer Bank
- Manager und Wissenschaftler in Optik- und Elektronikfirmen
- Selbständige Unternehmer



# Festkörperphysik



Hans Braun

v.l.n.r.:

A. Seilmeier,  
H. Pascher,  
H. Büttner,  
D. Rainer,  
H. Braun, G. Eska,  
S. van Smaalen,  
J. Küppers,  
E. Rößler,  
C. Müller,  
F. Göhmann

Nimmt man die Zahl der Nobelpreise als ein Maß für die Bedeutung, die einem Teilgebiet der Physik zugemessen wird, so stellt man fest, dass über die letzten 50 Jahre die Physik der kondensierten Materie und die Elementarteilchenphysik etwa gleich oft den Spitzenplatz erobert haben und zusammen etwa zwei Drittel der Preise erringen konnten. Die Elementarteilchenphysik darf für sich beanspruchen, der grundlegenden Frage nachzugehen, was unsere Welt letztlich "im Inneren zusammenhält". Die Physik der kondensierten Materie ist unserer

alltäglichen Erfahrung etwas näher liegend, denn die uns umgebende Welt, wie wir sie betrachten, erfüllen, erfahren können, ist zum überwiegenden Teil "kondensierte Materie", bestehend aus Fluiden oder festen Körpern. Sie wird gekennzeichnet durch Bausteine wie Atome, Ionen oder Moleküle, die räumlich in engem Kontakt und dadurch in Wechselwirkung miteinander stehen. Die Art der räumlichen Anordnung und die Kräfte zwischen den Bausteinen, die sie an Ort und Stelle halten, bestimmen die Eigenschaften der verschiedenen Arten fester Körper

oder Fluide. Die besondere Stellung der sogenannten "weichen Materie", nämlich der makromolekularen Körper oder der biologischen Stoffe, wird in einem eigenen Abschnitt behandelt. Hier soll nun vorgestellt werden, welche Forschungsrichtungen aus dem begrifflich etwas enger gefassten, aber immer noch weiten Feld der Physik fester Körper in Bayreuth vertreten sind.

Als idealer Zustand eines Festkörpers mag der kristalline Zustand angesehen werden, bei dem Atome, Ionen oder Moleküle, oder Gruppen dieser elementaren Bestandteile in einer regelmäßigen periodischen Anordnung vorliegen. Beim Zusammenhalt dieser Kristalle spielen elektrische Kräfte eine wesentliche Rolle. Unterschiede in den Eigenschaften der verschiedenen Arten von Festkörpern sind im Wesentlichen durch die Art und Weise bedingt, wie die äußeren Elektronen der Atome oder Ionen verteilt sind. Dabei dürfen die äußeren Elektronen nicht mehr dem einzelnen Atom oder Ion zugerechnet werden, sondern sie gehören sozusagen dem ganzen Kristall. Das Verhalten dieser Elektronen, speziell ihre energetischen Anregungen und Wechselwirkungen, bestimmt, ob der Festkörper ein Isolator ist, ob er metallische Leitfähigkeit zeigt oder ein Halbleiter ist, ob er magnetische Eigenschaften besitzt oder supraleitend wird.

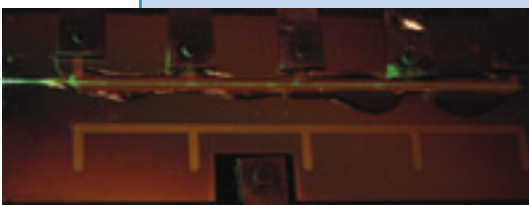
Wird die Anordnung oder die chemische Natur der elementaren Bausteine des Kristalls variiert, so ändern sich auch die physikali-

## Grenzen der Optoelektronik

A. Seilmeier

Die Arbeitsgruppe untersucht die Ladungsträgerdynamik in niedrigdimensionalen Halbleiter-Strukturen. Herkömmliche optoelektronische Halbleiterbauelemente, die elektrische Signale in Lichtsignale umwandeln und umgekehrt, lassen nämlich sehr schnelle Einschaltvorgänge zu, das Ausschalten dauert aber bis zu tausendmal länger. Verwendet man jedoch Intradimensionale

übergänge von Halbleiter-Schichtstrukturen, so sind die Ausschaltvorgänge genauso schnell wie Einschaltvorgänge. Diese Zeiten sind von vorrangiger Bedeutung für die Nachrichtenübertragung. Oben im Bild ist ein sogenanntes Quantum-Well-Infrarotdetektorelement gezeigt, das zur Untersuchung dieser Nichtgleichgewichtsprozesse mit ultrakurzen Lichtimpulsen verwendet wird. Andere wichtige Bauelemente für die optische Nachrichtenübertragung, aber auch für die Großbildprojektion mit Lasern, sind Modulatoren, mit denen intensives Laserlicht, das in Glasfasern geführt wird, mit hoher Frequenz moduliert und damit geschaltet werden kann. Dazu werden elasto-optische Modulatoren (Bild unten) erprobt, bei denen die Polarisationsrichtung des Lichtes durch ein Schallfeld mit hoher Frequenz geändert wird. ■





schen Eigenschaften. Daher ist die Kenntnis der Kristallstruktur von entscheidender Bedeutung für die Interpretation oder Vorhersage der physikalischen Eigenschaften eines Festkörpers, ebenso wie geeignete Methoden zur Materialsynthese und zur Kristallzucht Voraussetzungen für die experimentelle Erforschung dieser Eigenschaften sind.

Ein bedeutender Teil moderner Technologie basiert auf den speziellen Eigenschaften und Charakteristiken von festen Körpern verschiedenster Art. Ein oft bemühtes, aber zutreffendes Beispiel sind die Halbleiter. Mit der Erfindung des Transistors begann eine Entwicklung, die über die integrierte Schaltung bis hin zu immer schnelleren Bauteilen den modernen Computer hervorgebracht hat und deren Ende noch nicht abzusehen ist. In den heutigen Schaltelementen eines Computers wird vor allem die Tatsache genutzt, dass das Elektron eine Ladung besitzt und mit der Bewegung eines Elektrons zugleich ein elektrischer Strom, d. h. ein Transport von Ladungen möglich ist. Diese Ströme werden zum Schalten von Elementen und zum Speichern von Daten eingesetzt.

Besonders hohe Schaltgeschwindigkeiten werden an Heterostrukturen erreicht. Dies sind Stapel dünner Schichten von unterschiedlichen Halbleitermaterialien mit unterschiedlicher Anregungslücke, sogenannte Quantum-Well-Strukturen. Die Schichtdicken können einige Mikrometer betragen, aber auch so dünn wie eine Atomlage sein. In der Regel werden Paare von Materialien konstruiert, deren Kristallstrukturen zueinander passen. Solchen Untersuchungen widmet sich der Arbeitskreis Seilmeier (EP III).

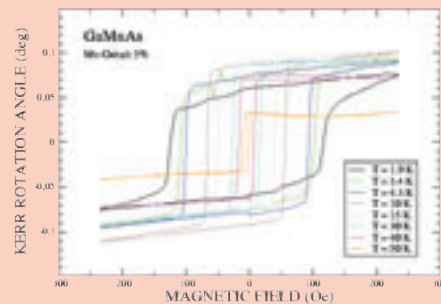
Das Elektron hat nicht nur eine Ladung, sondern es besitzt auch einen inneren Drehimpuls (Spin) und ein damit verbundenes quantisiertes magnetisches Moment, das die Grundlage des Magnetismus ist. Die Kombination von magnetischen und halbleitenden Eigen-

## Magnetismus sichtbar gemacht

H. Pascher

Die Arbeitsgruppe untersucht sowohl verdünnte magnetische Systeme wie z. B.  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  als auch binäre magnetische Halbleiter wie  $\text{EuSe}$  oder  $\text{MnTe}$  und Mikrostrukturen (Supergitter, Quantenpunkte) aus solchen Materialien. Dabei werden hochempfindliche magnetooptische Methoden eingesetzt, mit denen Informationen über magnetische und elektronische Eigenschaften gewonnen werden. Die Abbildung zeigt mit solchen Verfahren gemessene Hysteresekurven bei verschiedenen Temperaturen, aus denen direkt die Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung und die Koerzitivfeldstärke entnommen werden können.

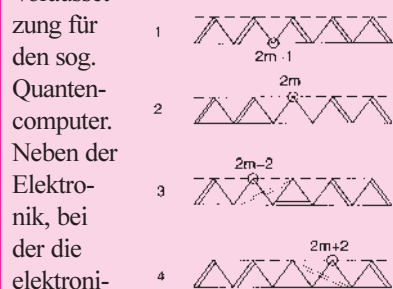
Bei diesen Verfahren wird die Oberfläche des Kristalls beobachtet, wobei kleinste Probenmengen ausreichen. Ins Innere sieht man mit kohärenter Ramanspektroskopie, mit der man z. B. an Supergittern (Heterostrukturen) paramagnetische Bereiche an Grenzflächen und antiferromagnetische geordnete Gebiete im Inneren erkennen kann. ■



## Vom Magnetismus zum Quantencomputer

H. Büttner

Ursprünglich wurde in den Manganaten mit perovskitartigen Strukturen die Abhängigkeit verschiedener magnetischer Ordnungszustände von der Dotierung mit leistungsfähigen numerischen Algorithmen beschrieben und mit den Beobachtungen verglichen. In einem weiteren Projekt wurden endliche Spinsysteme, z. B. große Moleküle studiert, an denen die einzelnen Spins gewissermaßen dirigiert werden können und so interessante quantenmechanische Eigenschaften zu Tage treten. Auf diese Weise kann man die Spins der Elektronen miteinander "verschränken". Diese Verschränkung erlaubt - da sie alle Möglichkeiten der Spineinstellungen umfasst - die einzelnen Spinzustände parallel zu verarbeiten; eine Voraussetzung für



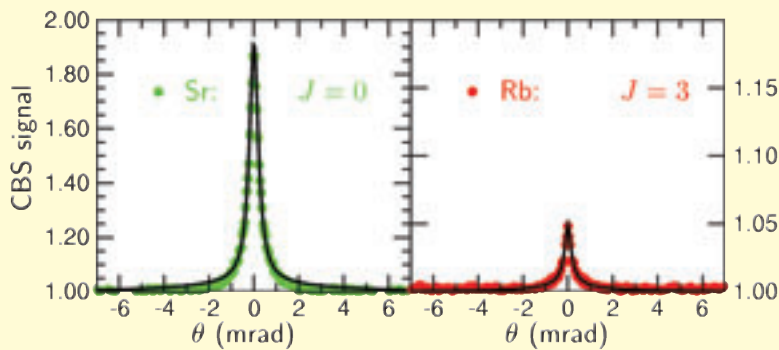
den sog. Quantencomputer. Neben der Elektronik, bei der die elektronische Ladung im wesentlichen eine Rolle spielt, wurde für diese Vorgänge das Wort "Spintronic" geprägt, weil im wesentlichen die Spineigenschaften der Ladungsträger ausgenutzt werden. Hierzu dienen Untersuchungen an Spinketten - das sind Spinsysteme, bei denen einzelne Spinträger nicht beweglich sind, sondern fest an einen Ort (Atom) gebunden sind. Die regelmäßige Anordnung dieser Spins auf endlichen Ketten mit verschiedenen Wechselwirkungen oder auch auf periodischen Ringen lässt sich dann sehr genau untersuchen und die Ergebnisse lassen vermuten, dass man mit solchen Systemen besonders gut den Verschränkungscharakter der Spins verstehen kann. Gezeigt sind Spinketten wobei die Spins jeweils an den Eckpunkten des Gitters angeordnet sind. Die Wechselwirkungen sind durch verschiedene Verbindungen (durchgezogene, doppelte, gebrochene Linien) gekennzeichnet. Hier wurde untersucht, welche Umordnungen der Wechselwirkungen ein fehlender Spin (durch den offenen Kreis symbolisiert) bewirken kann. ■

## Quantentransport von Licht und Materie

C. Müller

Die moderne Quantentheorie hat ihren Ursprung im präzisen Verständnis der Wechselwirkung von Licht mit Materie. Nun sind in den letzten Jahren lasergekühlte Atomgase und Bose-Einstein-Kondensate als Modellsysteme der Vielteilchenphysik kondensierter Materie hervorgetreten. In unserer Arbeitsgruppe untersuchen wir den Transport von Licht in atomaren Gasen, sowie das quantenmechanisch komplementäre Szenario: den Transport atomarer Materiewellen in Lichtpotentialen. Insbesondere soll geklärt werden, welche Rolle der Spin bei der Unterdrückung des diffusiven Transports aufgrund von Interferenz, der sogenannten Anderson-Lokalisierung, spielt. Wir wissen heute, dass eine Kop-

plung des Lichtfeldes an interne atomare Spinfreiheitsgrade die Quantenkorrekturen verringert: die Abbildung zeigt experimentelle Daten zur kohärenten Lichtstreuung an kalten Atomen mit und ohne Spin. Die durchgezogenen Kurven sind die theoretischen Vorhersagen, eine Kombination aus Analytik und numerischer Simulation ohne freie Parameter. Ausgehend von der quantenmechanischen Beschreibung des gekoppelten Systems "Materie + Licht", bleibt dann nach einer statistischen Mittelung über atomare Zufallsverteilungen eine klassische, effektive Theorie für die Lichtausbreitung zurück, wie sie uns z.B. von der Diffusion von Licht in dichten Wolken vertraut ist. ■



schaften von Materialien verspricht für die nahe Zukunft neuartige Anwendungen. Entscheidend ist dabei die Beherrschung des Spin-Transports. Auf diesem Gebiet ist die Arbeitsgruppe Pascher (EP I) tätig. Werden die Spins der Elektronen durch gegenseitigen Einfluß oder auch in Wechselwirkung mit den Atomkernen gleichmäßig ausgerichtet, so liegt ferromagnetische Ordnung vor. Besonders spannend werden Untersuchungen an Festkörpern, wenn sowohl die Ladung als auch der Spin mit den übrigen Freiheitsgraden des festen Materials, wie z. B. seinen Gitterschwingungen, wechselwirkt. Hier sind in den letzten Jahren in der Arbeitsgruppe Büttner (TP I) eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden, insbesondere auch unter Leitung von Prof. Fehske, der einem Ruf an die Universität Greifswald gefolgt ist.

Die moderne Quantentheorie hat ihren Ursprung im präzisen Verständnis der Wechselwirkung von Licht mit Materie. Nun sind in den letzten Jahren lasergekühlte Atomgase und Bose-Einstein-Kondensate als Modellsysteme der Vielteilchenphysik kondensierter Materie hervorgetreten. Diese Phänomene werden in der Arbeitsgruppe von Dr. C. Müller (TP I) untersucht.

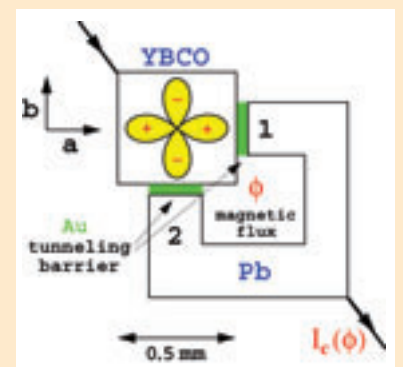
## Symmetrien im Hochtemperatursupraleiter

D. Rainer

Die Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe liegen auf dem Gebiet der quantentheoretischen Beschreibung kondensierter Materie bei tiefen Temperaturen. Dabei werden Vielteilcheneffekte in metallischen Festkörpern und in Quantenflüssigkeiten untersucht, wobei besonderes Gewicht auf Supraleiter und Suprafluide gelegt wird. Supraleitung und Suprafluidität sind Quantenphänomene, die sich einer anschaulichen Interpretation entziehen. Bezeichnend für diese Situation ist, dass erst 46 Jahre nach der experimentellen Entdeckung der Supraleitung durch H. Kamerlingh Onnes (1911)

eine umfassende Theorie der Supraleitung durch Bardeen, Cooper und Schrieffer (1957) entwickelt worden ist. Unser theoretisches Rüstzeug ist eine Weiterentwicklung der Theorie von Bardeen, Cooper und Schrieffer, die sogenannte Quasi-klassische Theorie. Sie verbindet die klassische Transporttheorie der Leitungselektronen mit der Quantentheorie der sog. inneren Freiheitsgrade. Damit kann z. B. die Symmetrie des Ordnungsparameters eines Supraleiters studiert werden. Im Bild wird das Schema eines Experimentes von Wollmann et al. (1993) gezeigt, mit dem der

Nachweis der unkonventionellen d-Symmetrie des Ordnungsparameters im Hochtemperatur-Supraleiter  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.8}$  gelang. ■



Alle Formen magnetischer Ordnung sowie die Supraleitung sind kollektive Quantenphänomene, bei deren detaillierter mikroskopischer Beschreibung noch viele Fragen offen sind. Die Theorie dieser und anderer Quantenphänomene wird mit verschiedenen Methoden in der Arbeitsgruppe Rainer (TP III) und der Arbeitsgruppe von Dr. F. Göhmann (TP I) entwickelt. Welcher Mechanismus zum Auftreten von Hochtemperatur-Supraleitung bei 90...130 K (-180 °C - 140 °C) führt, ist noch nicht im Detail verstanden.

Auf Grund der Coulomb-Wechselwirkung stoßen sich Elektronen ab, durch die Wechselwirkung mit Gitterschwingungen kann jedoch eine effektive anziehende Wechselwirkung zwischen Elektronen entstehen, die dann zur Supraleitung führt. Supraleitung und magnetische Ordnung sind dabei antagonistische Phänomene, denn Voraussetzung für die anziehende Wechselwirkung unter den Elektronen ist eine bestimmte Ausrichtung ihrer Spins, die im herkömmlichen Verständnis nicht mit ferromagnetischer Ordnung einhergehen kann. Auffallend ist jedoch, dass antiferromagnetische Ordnung und Supraleitung bei den Hochtemperatur-Supraleitern mit ihrer perovskitartigen Kristallstruktur nahe benachbarte Phänomene sind, zwischen denen durch Dotierung umgeschaltet werden kann, ähnlich wie im Fall der Manganate zwischen magnetischen Ordnungsphänomenen. In der Arbeitsgruppe Braun (EP V) werden Hochtemperatur-Supraleiter experimentell untersucht.

Supraleitung ist ein Ordnungsphänomen, das schon bei relativ hohen Temperaturen auftreten kann. Kühlt man Materie auf noch tiefere Temperaturen ab, machen sich immer schwächere Wechselwirkungen bemerkbar, die ebenfalls zu kollektiver Ordnung führen können. Die Suprafluidität von Helium ist wohl das bekannteste Beispiel dafür. In der Nähe des absoluten

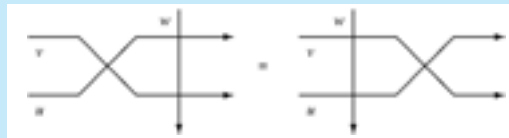
## Exakt lösbare Vielteilchensysteme

F. Göhmann

Ziel jeglicher Art von theoretischer Physik ist es, ausgehend von elementaren Gesetzmäßigkeiten, das Verhalten oder die Eigenschaften komplexer, zusammengesetzter Systeme vorherzusagen. Im Rahmen der Festkörperphysik bedeutet dies beispielsweise, dass man die elastischen, die optischen oder auch die magnetischen Eigenschaften eines Kristalls ausgehend von den Eigenschaften der Atome, aus denen er zusammengesetzt ist, berechnen möchte. Von diesem Ziel ist man heute noch weit entfernt. Man behilft sich häufig erfolgreich mit mikroskopischen oder makroskopischen, phänomenologischen Modellen. Insbesondere bei der detaillierten mikroskopischen Beschreibung kollektiver Quantenphänomene (zu denen z.B. alle Formen mag-

netischer Ordnung sowie die Supraleitung zählen) gibt es jedoch viele offene Fragen.

Wir untersuchen vereinfachte mikroskopische Modelle, wie das Hubbard-, das t-J- oder das Heisenbergmodell, die nur eine kleine Zahl phänomenologischer Parameter enthalten und echte Vielteilchen-Quantensysteme sind. Davon erwarten wir uns ein qualitatives Verständnis kollektiver Quantenphänomene. Wir beschränken uns zumeist auf räumlich eindimensionale Modelle, die sich mit Hilfe moderner algebraischer Methoden, beruhend auf der sogenannten Yang-Baxter-Gleichung, exakt behandeln lassen. ■



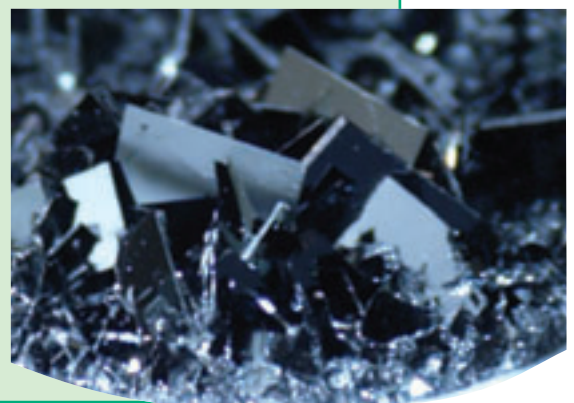
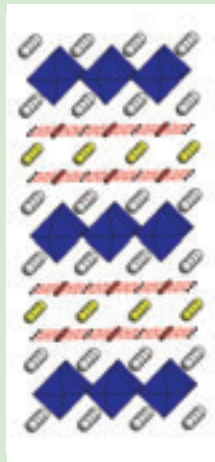
## Magnetische Supraleiter

H. Braun

Der wohl bekannteste Hochtemperatur-Supraleiter ist  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Strukturell eng mit diesen verwandt sind die in der Arbeitsgruppe entdeckten Ruthenocuprate vom Typ  $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_2$  und  $\text{RuSr}_2(\text{Gd,Ce})_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ . Dies sind äußerst ungewöhnliche Verbindungen, da ihnen zum ersten Mal die Koexistenz von schwachem Ferromagnetismus und Supraleitung beobachtet wurde.

Ihre typische geschichtete Kristallstruktur besteht aus leitfähigen  $\text{CuO}_2$ -Ebenen (in der Abb. rot hervorgehoben), die als Träger der Supraleitung angesehen werden. Die zwischen den Ebenenpaaren liegenden Schichten dienen als Ladungsträgerreservoir, sind aber in der Regel selbst nicht oder nur wenig leitfähig. In den Ruthenocupraten bestehen diese Zwischen-

lagen aus Ru-O-Oktaedern (blau). Die magnetischen Momente der Ru-Atome ordnen unterhalb von ca. 140 K antiferromagnetisch mit einer schwach ferromagnetischen Komponente. Da unterhalb von 3 K ausserdem die Gd-Momente antiferromagnetisch ordnen, stehen in den Ruthenocupraten sogar drei Ordnungsphänomene miteinander im Wettstreit. ■



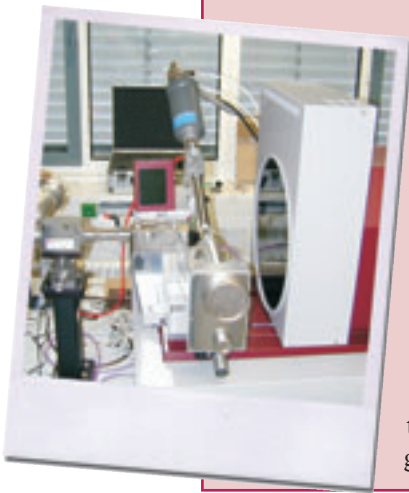


## Von der Strukturbestimmung zum Materials Engineering

S. van Smaalen

Experimenteller Schwerpunkt der Arbeitsgruppe ist die Röntgenbeugung unter extremen Bedingungen, insbes. bei tiefen Temperaturen und hohen Drücken. Mit der Röntgenbeugung kann die atomare Struktur von kristallinen Materialien in großem Detail bestimmt werden. Die Kristallstruktur als Funktion der Temperatur oder des Drucks dient als Basis für Modelle zur Beschreibung von Phasenumwandlungen. Sie erlaubt es, starke und schwache chemische Bindungen zu identifizieren und führt damit zum Verständnis der Stabilität von Materialien. Letztendlich können die aus den Strukturuntersuchungen gewonnenen

Prinzipien des Kristalls zur Vorhersage von stabilen Materialien und deren Eigenschaften eingesetzt werden ("Materials Engineering"). Aperiodische Kristalle sind kristalline Verbindungen, bei denen die geordnete atomare Struktur nicht in Form einer periodischen Wiederholung eines Bausteins vorliegt. Die Aperiodizität der Kristallstruktur ist verantwortlich für eine Reihe von besonderen physikalischen Eigenschaften, wie die nicht-lineare elektrische Leitfähigkeit oder auch die sehr guten Antihafteigenschaften metallischer Quasikristalle. Die aperiodische Kristallstruktur führt zu schwachen zusätzlichen Beugungseffekten, die nur mit Synchrotronstrahlung gemessen werden können. Eine Fragestellung, die am Lehrstuhl für Kristallographie bearbeitet wird, bezieht sich auf die Erklärung der Stabilität aperiodischer Kristalle gegenüber der normalen, periodischen Kristallstruktur. ■

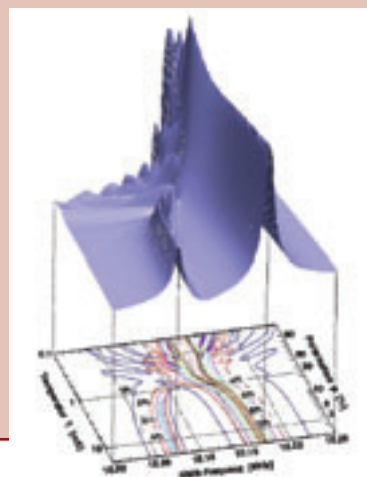


## Spindynamik bei tiefsten Temperaturen

G Eska

Die Arbeitsgruppe untersucht mit hochfrequenten Messmethoden wie Ultraschall und kernmagnetischer Resonanz Ordnungsphänomene bei tiefsten Temperaturen. Dabei interessiert neben dem Masse-, Spin- und Ladungstransport vor allem die Dynamik des Parameters, der die Ordnung dieser Systeme beschreibt. Die Abbildung demonstriert am Beispiel des Hochfrequenzspektrums eines simplen Metalls (Thallium), wie komplex - im Vergleich zu hohen Temperaturen - alles bei tiefen Temperaturen werden kann: Aus ursprünglich zwei Linien im Spektrum entwickelt sich ein ganzes Gebirge. Ähnlich komplex entwickelt sich das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, wenn man sie bei tiefen Temperaturen in

nanostrukturierte Kanäle einsperrt. Die dabei auftretenden Effekte können genutzt werden, um äußerst sensitive Gyrometer zu bauen, mit denen sich Schwankungen in der Erdrotation sehr viel genauer bestimmen ließen, als die derzeit mit den Instrumenten der Geophysik möglich ist. ■



Nullpunktes der Temperatur (einige milliardstel bis tausendstel Grad darüber) kann es in Materie zu einer spontanen Ordnung der Atomkerne kommen. Solche kollektiven Ordnungsphänomene bei tiefsten Temperaturen werden in der Arbeitsgruppe Eska (EP V) experimentell untersucht.

Die Bedeutung der Kenntnis der Kristallstrukturen fester Körper wurde bereits erwähnt. Die Kristallographie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die Probleme mit einem physikalischen, chemischen, biowissenschaftlichen, materialwissenschaftlichen, mineralogischen oder geowissenschaftlichen Hintergrund zu lösen versucht. Die Kristallographie studiert kristalline Materialien, wie z. B. Metalle, keramische Materialien und Proteinkristalle, und sie versucht, Eigenschaften und Prozesse mit Hilfe der atomaren Struktur zu erklären. Im Arbeitskreis van Smaalen geht es vor allem um sog. aperiodische Kristalle, Festkörper mit sehr erstaunlichen Symmetrie-Eigenschaften.

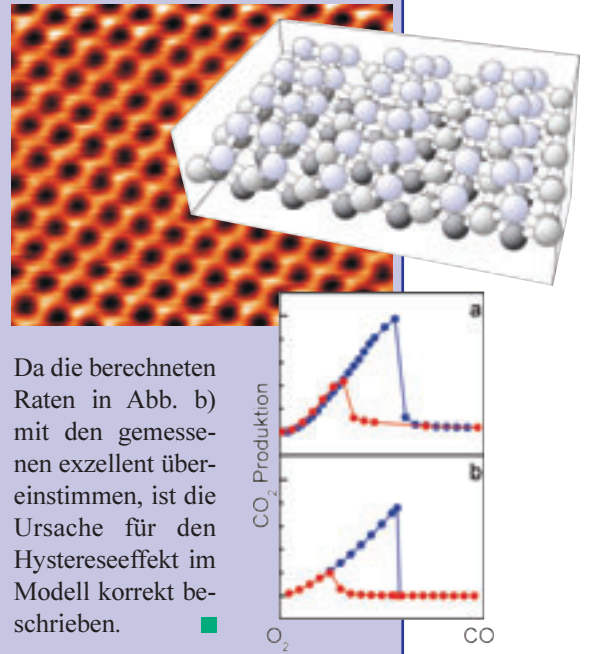
Auf Reaktionen an Oberflächen beruhen Verfahren, mit denen weltweit jährlich eine Wertschöpfung von über Tausend Milliarden Euro erzielt wird. Produkte wie schwefelfreier Treibstoff, Mikroprozessoren und Flachbildschirme wären ohne Einsatz von Oberflächenprozessen nicht herstellbar. Wie diese Prozesse auf mikroskopischer Ebene in Einzelschritten ablaufen, ist trotz ihrer breiten Anwendung in vielen Fällen nicht geklärt. Für die Forschung ergibt sich damit die Möglichkeit, durch Untersuchungen an Modellen zum Verständnis dieser Prozesse beizutragen. Einfache Modellreaktionen sind etwa Reaktionen von Wasserstoffatomen H mit Oberflächen von Metallen und Halbleitern, wichtig für die Herstellung von Flachbildschirmen, oder die Oxidation von Kohlenmonoxid, die auch im "Kat" von Kraftfahrzeugen abläuft. Solche Reaktionen werden in der Arbeitsgruppe Küppers (EP III) untersucht.

## Reaktionen an Oberflächen

J. Küppers

Auf den Oberflächen von Si(100) (Modell) und Graphit (0001) (Tunnelmikroskop-Bild) wird H zwar stark gebunden, kann aber durch H aus der Gasphase unter Bildung von molekularem Wasserstoff ( $H_2$ ) wieder abstrahiert werden:  $H(\text{Gas}) + H(\text{Of}) \rightarrow H_2$ , da mit der Abstraktion ein beträchtlicher Energiegewinn verbunden ist. In der Regel ist die Geschwindigkeit (Rate) einer einfachen Oberflächenreaktion nur abhängig von Parametern wie Temperatur, Drücke der Reaktionspartner, etc. Dass sich zwei unterschiedliche Raten ergeben, je nachdem, wie man diese Drücke einstellt, von hohen oder niedrigen Werten her, kann man aber auch beobachten. Abb. a)

zeigt die Raten der Produktion von Kohlendioxid ( $CO_2$ ) aus Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlenmonoxid ( $CO$ ) auf einer Ir(111) Oberfläche, gemessen beginnend mit hohem  $O_2$ -Anteil (auf, blau) oder mit hohem  $CO$ -Anteil (ab, rot). Offensichtlich sind die "auf"- und "ab"-Raten sehr verschieden. Durch geeignete Experimentführung kann man sogar zwischen den beiden Ratenzweigen hin- und herschalten. Diese Reaktions-"Hysterese" deutet auf einen Einfluss von Nichtlinearitäten im gekoppelten System der einzelnen Elementarprozesse der Gesamtreaktion hin. Nach einer Analyse der Einzelschritte lässt sich die Gesamtreaktion modellieren und mathematisch beschreiben.



Da die berechneten Raten in Abb. b) mit den gemessenen exzellent übereinstimmen, ist die Ursache für den Hystereseeffekt im Modell korrekt beschrieben. ■

## Der Glasübergang: ein ungelöstes Problem

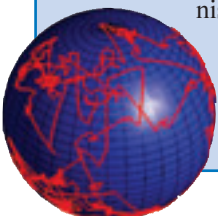
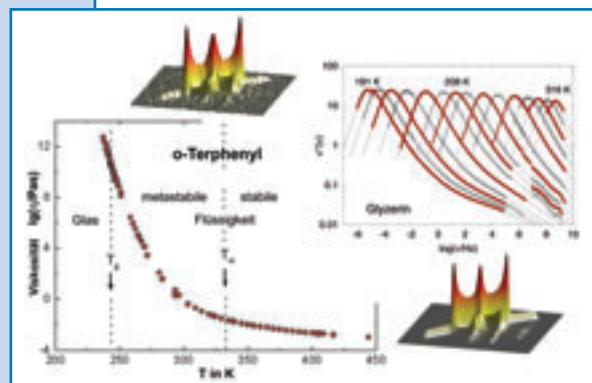
E. Rößler

Der stabile Zustand eines Festkörpers ist der Kristall; Atome oder Moleküle bauen ein regelmäßiges Gitter auf. Kühlt man eine Flüssigkeit schnell ab, dann lässt sich Kristallisation häufig vermeiden, und man erhält das amorphe Glas. Bei diesem Glasübergang nimmt die Viskosität der unterkühlten Flüssigkeit kontinuierlich zu, bis sie Werte erreicht, die typisch für einen Festkörper sind. Die Flüssigkeit erstarrt viskos, d.h. ihre Struktur wird eingefroren. Dem Glaszustand fehlt die Struktur eines ferngeordneten Gitters, die im Fall der Kristalle die Beschreibung erleichtert. In jüngster Zeit gibt es Ansätze, die den Glasübergang als eine "Reibungskatastrophe" verstehen, bei der die Moleküle einen sich "zusammenziehenden Käfig" bilden; infolge von Rückkopplungseffekten kommt es zum viskosen Erstarren. Das Studium des Glasübergangs erfolgt an

Modellsystemen, wie organischen Flüssigkeiten (z.B. o-Terphenyl), die erst bei tiefen Temperaturen erstarren.

Im Glaszustand überleben besondere Formen der molekularen Beweglichkeit. Zu ihrer Charakterisierung müssen verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. Neben dielektrischer Spektroskopie – vergl.  $\epsilon''(\nu)$  – und Lichtstreuung stellt die kernmagnetische Resonanz-Spektroskopie (NMR) einen Schwerpunkt der Arbeitsgruppe dar. Mit ihr kann die Dynamik der Komponenten in binären Gläsern (z.B. Polymer-Weichmacher-Systeme) getrennt erfasst werden. Ein zwei-dimensionales NMR-Spektrum liefert eine direkte Abbildung der molekularen Rotation. So belegen die Spektren (Messung vs. Simulation), dass die kleinere Komponente (Weichmacher) auch im Glaszustand noch langsam rotiert. Zudem gibt es langsame und schnelle Moleküle, zwischen denen ein Austausch stattfindet. Die Berechnung von Millionen von Rotationstrajektorien erlaubt es, die Bewegung der Moleküle zu simulieren und die Spektren zu reproduzieren. ■

Kondensierte Materie muß nicht entweder als Flüssigkeit oder als wohlgeordneter Kristall vorliegen, in gewissem Sinn "dazwischen" liegt das Glas. Der Glaszustand wird durch hinreichend schnelles Abkühlen einer Flüssigkeit hergestellt. Man lässt der Flüssigkeit keine Zeit zum Kristallisieren, und sie "erstarrt viskos". Bei diesem Glasübergang nimmt die Viskosität kontinuierlich um ca. 16 Dekaden zu; ein einmaliger Vorgang in der Natur! Die molekulare Dynamik verlangsamt sich somit enorm. Der Glasübergang wie auch die Struktur des Glases sind ungelöste Probleme der Physik der kondensierten Materie. Mit Hilfe verschiedener spektroskopischer Methoden wird dieses Problem von der Arbeitsgruppe Rößler (EP II) angegangen. ■



# Makromolekülforschung und Biophysik

Makromoleküle sind die Bausteine der Kunststoffe, und sie sind Bestandteile der lebenden Materie. Sie bestehen aus einer sehr großen Zahl von Atomen, die insbesondere in der Biomaterie oft große zusammenhängende Bereiche bilden können. Interessanterweise beobachtet man in makromolekularen Materialien eine Hierarchie der Wechselwirkungsstärke. Benachbarte Atome sind durch chemische Bindungen stark gekoppelt, Kräfte zwischen den Domänen sind schwächer und solche zwischen den Makromolekülen sind noch kleiner. Deshalb ist die aus Makromolekülen bestehende Materie weich. Darin unterscheidet sie sich nicht nur makroskopisch, sondern auch mikroskopisch in ihren Strukturen und ihrer Dynamik wesentlich von harten anorganischen Festkörpern. Die weiche Materie ist in den vergangenen Jahrzehnten zu einem bedeutenden Gegenstand der physikalischen, chemischen und biologischen Forschung geworden.

Die besonderen Eigenschaften dieser Makromoleküle, deren Verständnis immer noch unvollständig, aber von großer wissenschaftlicher und technischer Bedeutung ist, liegen zunächst in ihrer Strukturvielfalt begründet. Die synthetisch hergestellten Polymere wie z.B. Plexiglas sind oft langgestreckte Ketten aus identischen Wiederholeinheiten. Sie bilden spaghettiähnliche, ungeordnete Strukturen, und wesentliche Einsichten in ihre grundlegenden Eigenschaften können mit Hilfe statistischer Modelle gewonnen werden, in denen molekulare Details des chemischen Aufbaus überhaupt nicht mehr vorkommen. Mit aufwändigeren Syntheseverfahren lassen sich so genannte Block-Copolymere herstellen, die sich spontan zu regelmäßigen Nanostrukturen anordnen und die sich für komplexe Anwendungen eignen, wie z.B. zur Herstellung von Membranen mit ultrafeinen



Poren. Die einzelnen Bausteine können sich aber auch auf einem Kristallgitter anordnen, ähnlich wie die Atome in einem Gold-, Silizium- oder Salz-Kristall. Mit der Vielfalt der Strukturen geht die Vielfalt der physikalischen Eigenschaften Hand in Hand: Synthetische Makromoleküle können Isolatoren sein wie z.B. Gummi, oder sie können andererseits den elektrischen Strom leiten. Hoch leitfähige Polymere oder Makromolekülkristalle sind schon seit etwa 30 Jahren bekannt. Ebenso können Polymere lichtempfindlich sein, wie dies z.B. bei der Photographie oder bei optischen Datenspeichern (CDs) gewünscht wird. Polymere können jedoch auch innerhalb gewisser Grenzen 'lichtecht', d.h. lichtunempfindlich gemacht werden, indem man geeignete Farbstoffe zusetzt. Dies wussten bereits die alten Ägypter, die ihre Mumien im Sonnenlicht haltbar gemacht haben.

Das Verständnis biologischer Prozesse erfordert zunehmend die Aufklärung der grundlegenden dynamischen Vorgänge in und zwischen den beteiligten Biomolekülen und damit den Einsatz physikalischen Wissens. Aktuelle Beispiele sind die Erforschung der Informationsspeicherung in der Desoxyribonukleinsäure (DNS) sowie der Selbstorganisationsprozesse von Proteinen und Lipiden zu funktionsfähigen Zellen. Man untersucht solche Prozesse mit der Methodik der Physik, d.h. man

erstellt aus den experimentell gewonnenen Erkenntnissen ein theoretisches Modell, um eine quantitative Beschreibung des Phänomens zu erzielen. Ein weiterer Einfluss der Physik auf die Biologie resultiert aus der Weiter- bzw. Neuentwicklung experimenteller Techniken. Hier haben die Ergebnisse physikalischer Grundlagenforschung zu fundamentalen und epochalen Fortschritten in den Biowissenschaften geführt. Beispielsweise haben die Methoden der Aufklärung mikroskopischer, nanoskopischer und molekularer Strukturen - die Mikroskopie, die Elektronenmikroskopie, die Röntgenbeugung und die Kernspinresonanz - regelrechte Revolutionen ausgelöst. Auch die verschiedenen Verfahren der Spektroskopie zur Aufklärung der elektronischen Strukturen und der dynamischen Prozesse von Biomolekülen sind in der physikalischen Forschung entwickelt worden. Der jüngste große Fortschritt auf diesem Gebiet ist die Spektroskopie einzelner Moleküle. Die erste Publikation zu der inzwischen weltweit praktizierten Einzelmolekülspektroskopie stammt von dem Bayreuther Experimentalphysiker Lothar Kador und seinem amerikanischen Kollegen W.E. Moerner. Die folgenden Beispiele zeigen, dass heute bereits sehr viele Details bekannt sind und dass dieses Wissen zunehmend faszinierende und neue Anwendungen organischer Makromoleküle ermöglicht.

*Bild oben rechts (v.l.n.r.): W. Köhler, M. Schwoerer, D. Haarer, L. Kador, A. Ott, J. Köhler, D. Klostermeier, H.R. Brand*



## Polymerdynamik

W. Köhler

Die meisten Polymere sind lange fadenförmige Makromoleküle, aufgebaut durch tausendfache Wiederholung identischer nanometergroßer Monomereinheiten. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität bilden die Polymerketten sich wechselseitig durchdringende statistische Knäuel. Die makroskopischen Eigenschaften von Polymeren, wie die für die Verarbeitung in Spritzgussmaschinen wichtige Schmelzviskosität, hängen in direkter Weise mit mikroskopischen Bewegungen der einzelnen Makromoleküle zusammen. Lange verknäuelte und miteinander verhakte Polymerketten können sich nur noch längs ihrer eigenen Kontur bewegen, so wie sich eine einzelne Nudel aus einem Topf voll gekochter Spaghetti ziehen lässt. Bewegungen quer zur Kontur sind nicht möglich. Wegen der Ähnlichkeit zur Fortbewegung der Reptilien bezeichnet man diese Bewegungsmoden als Reptation. Bei schnellen Deformationen, d.h. auf kurzen Zeitskalen, wirken die topologischen Verschlaufungen wie chemische Bindungen, und Polymerschmelzen verhalten sich deshalb gummiartig. Auf langen Zeitskalen können sich die Verschlaufungen lösen, und die Polymerschmelze wird zur Flüssigkeit.

wie andere Flüssigkeiten auch, nur im statistischen Mittel homogen und isotrop. Lokal unterliegen sowohl die Konzentration als auch die Orientierung der Moleküle thermodynamischen Fluktuationen. Diese Fluktuationen sind im Allgemeinen kurzlebiger Natur, mit Korrelationszeiten im Bereich von Mikro- bis Millisekunden. Sie können unter speziellen Bedingungen, wie in der Nähe eines kritischen Punktes oder in der Umgebung der Glastemperatur, aber auch sehr langlebig werden. Im Experiment manifestieren sich die Fluktuationen als Rauschen im Licht, das von einer Polymerprobe gestreut wurde. Mittels Photonenkorrelations-spektroskopie kann dieses Rauschen analysiert und daraus auf molekulare Bewegungen zurückgeschlossen werden. Moderne holographische Verfahren erlauben es, unter trickreicher Ausnutzung der Kopplung zwischen Temperatur und Konzentration, selektiv nur bestimmte Moden des thermodynamischen Rauschspektrums anzuregen und die zugrunde liegenden Wechselwirkungen zu studieren.

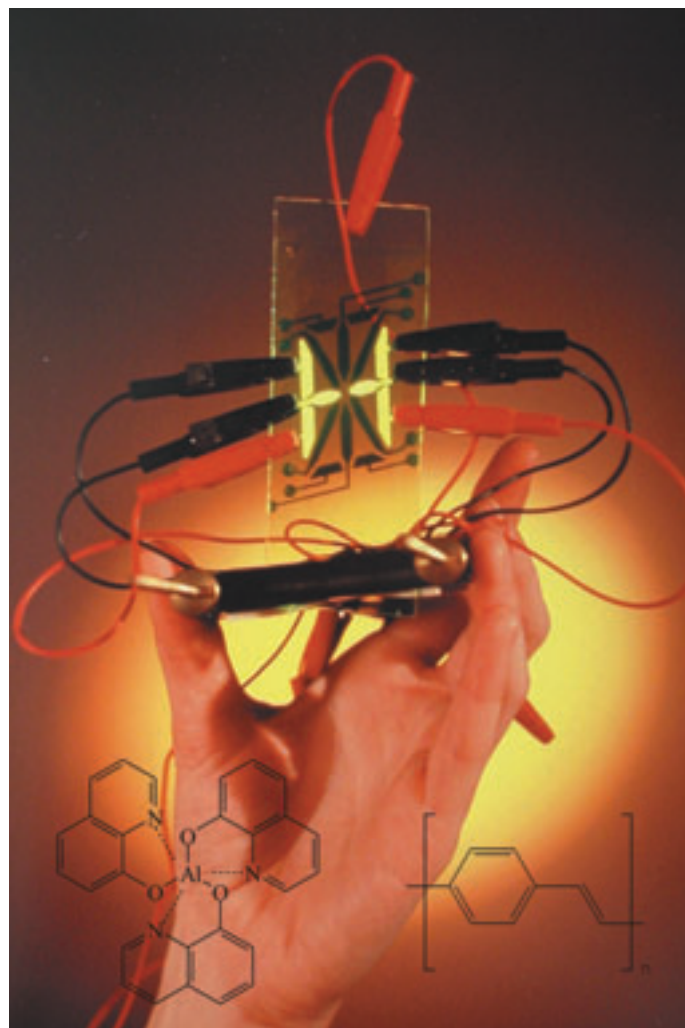
## Die organische Leuchtdiode (OLED)

M. Schwoerer

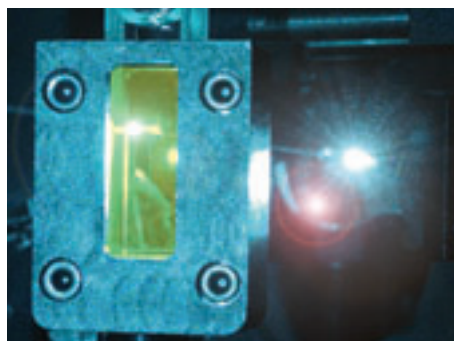
Dünne Schichten aus großen organischen Molekülen oder Polymeren können ähnliche elektrische und optische Eigenschaften besitzen wie anorganische Halbleiter. Aus diesen organischen Halbleitern können Leuchtdioden (OLEDs) hergestellt werden. Sie emittieren Licht, wenn in der Schicht ein elektrischer Strom fließt. Mit chemisch verschiedenen Makromolekülschichten lässt sich Licht in allen sichtbaren Farben erzeugen.

Das Bild zeigt den Laboraufbau einer 16-Segment-Anzeige in Betrieb. Jedes Segment ist eine OLED. Nur diejenigen Segmente leuchten, die unter elektrischer

Spannung stehen und durch die deshalb ein Strom fließt.



Jedes Segment (jede OLED) besteht aus einem Stapel dünner Schichten, die nicht nur transparent und elektrisch leitfähig sind, sondern deren physikalische Eigenschaften so auf einander abgestimmt sind, dass die OLED eine hohe Lichtausbeute besitzt. Jede Schicht ist dünner als 100 Nanometer. Beim Einschalten der äußeren Spannung von weniger als 5 Volt zwischen der oberen und der unteren Deckschicht, also zwischen den Elektroden, fließt der elektrische Strom, und es kommt instantan zur Emission des Lichts. Es entsteht bei der so genannten Elektron-Loch-Rekombination in einer der organischen Schichten. Die Farbe des Lichts hängt von der Art der Moleküle ab, aus denen diese aktive Schicht besteht.

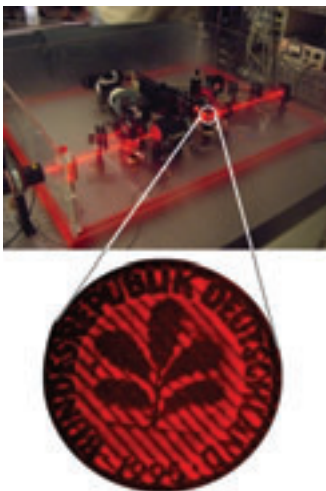


Zeitaufgelöste Holographie und Lichtstreuung liefern wichtige Informationen über molekulare Bewegungsmechanismen. Polymere und Polymerlösungen sind,

Seit dem Frühstadium der OLEDs Anfang der 90er Jahre hat weltweit eine rasante industrielle Entwicklung stattgefunden, die durch zahlreiche akademische Forschungslabors angestoßen oder unterstützt wurde. Auch ehemalige Mitarbeiter des Physikalischen Instituts der UBT haben maßgeblich dazu beigetragen, dass inzwischen Bildschirme aus OLEDs kurz vor der Marktreife stehen, die in ihrem Flächenauflösungsvermögen, ihrer Farbreinheit, ihrem variablen Betrachtungswinkel, ihrem Zeitauflösungsvermögen (Videotauglichkeit), ihrer Helligkeit und ihrer Betriebslebensdauer vergleichbar oder besser sind als herkömmliche Bildschirme. Dazu war die Entwicklung vieler technischer Details notwendig. So musste die Pixelgröße, also die Größe der Segmente, auf etwa ein Zehntel eines Quadratmillimeters reduziert und in drei Segmente mit reinen Farben (Rot, Grün, Blau) strukturiert werden. Insbesondere war es aber zunächst notwendig, die grundlegenden elektronischen und optischen Prozesse in den Schichten aufzuklären. Eine enge Kooperation von Physikern, Chemikern und Ingenieuren in der Grundlagenforschung war und ist auch künftig dazu unabdingbar.

### Holographische Datenspeicherung in Polymeren

*D. Haarer*



Die Informationsspeicherung in Polymeren ist eine faszinierende technische Entwicklung der letzten 30 Jahre. Die Erfindung der CD hat es erstmals ermöglicht, Musik in digitaler Form mit einer bis dahin unbekanntem Qualität auf einer Plastikscheibe von 12 cm Durchmesser zu speichern. Die jüngst eingeführte

DVD ist wiederum eine Plastikscheibe mit 12 cm Durchmesser hat aber eine 10-fach höhere Speicherkapazität (etwa 10 Gigabyte); somit erlaubt die DVD-Platte die Speicherung ganzer Filme und setzt - ähnlich wie die CD vor 30 Jahren - derzeit zu einem weltweiten Siegeszug an. Um noch höhere Speicherdichten auf Plastikscheiben zu ermöglichen, benötigt man Hologramme, die Bilder nicht nur auf deren Oberfläche, sondern in ihrem ganzen Volumen speichern können. Dies geschieht durch gleichzeitige Belichtung des Datenspeichers mit zwei Laserstrahlen, von denen einer am Objekt - hier einer Pfennigmünze - reflektiert wird. Der experimentelle Aufbau für das Erzeugen von Hologrammen ist im oberen Teil der Abb. gezeigt. In dem weißen Kreis kreuzen sich die roten Laserstrahlen und schreiben so das Hologramm der Pfennigmünze. Der untere Teil der Abb. zeigt das rekonstruierte Objekt. Der Pfennig wurde durch Anschlagen mit einem kleinen Hammer zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen sind für das Auge unsichtbar; sie erscheinen jedoch auf dem rekonstruierten Bild als Muster von Schallwellen, die quer durch die Münze hindurch laufen. Holographische Speicher können etwa 100mal mehr Information aufnehmen als DVD-Scheiben; sie sind heute noch nicht Stand der Technik.

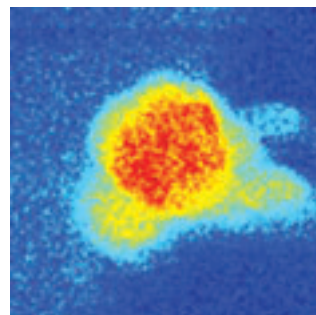
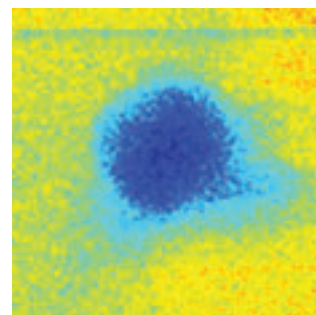
Die für optische Datenspeicherung nötigen lichtempfindlichen (optisch adressierbaren) Materialien werden in den Polymerchemie-Arbeitsgruppen der Universität Bayreuth synthetisiert. Um den Anforderungen der holographischen Speicherung gerecht zu werden, benötigt man teilweise sehr komplexe Polymere (Block-Copolymere), die spontan geordnete Strukturen bilden. Diese Strukturen liegen in der Größenordnung von 100 nm (1 nm ist ein Millionstel Millimeter); sie sind so fein, dass sie nicht mehr mit Licht, sondern nur mit Hilfe der Elektronen-

mikroskopie sichtbar gemacht werden können.

### Konfokale Raman-Mikroskopie an Polymeren

*L. Kador*

Moderne Verfahren der Laserspektroskopie liefern, obwohl sie im Allgemeinen nur sichtbares Licht verwenden, viel detailliertere Informationen, als man durch einfaches Betrachten einer Probe erhalten würde. Ein Beispiel ist die konfokale Raman-Mikroskopie. Hierbei bestrahlt man die Probe Punkt für Punkt mit einem Laser und misst jeweils die Wellenlängenverteilung des Streulichtes, das so genannte Raman-Spektrum. Da dieses von der chemischen Zusammensetzung der beleuchteten Stelle abhängt, kann man ein chemisches Abbild der Probe mit rein optischen Mitteln, d.h. zerstörungsfrei erhalten. Die räumliche Auflösung liegt dabei im Bereich der halben Lichtwellenlänge, also bei etwa 0,3 Mikrometern. Die beiden Bilder zeigen die Verteilung der Polymere Polystyrol (oben) und Polybutadien (unten) in einem aus der



*Bildausschnitt: 100 x 100 Mikrometer; Diplomarbeit Tobias Schittkowski, 2000*



Schmelze durch Abkühlen gewonnenen festen Gemisch. Rote und gelbe Farbtöne bedeuten hohe, blaue und grüne Farbtöne niedrige Konzentration. Die Komplementarität der Bilder zeigt deutlich einen Einschluss von Polystyrol in dem im Überschuss vorhandenen Polybutadien. Die Abbildung ist typisch für Polymergemische, die fast ausnahmslos dazu neigen, sich beim Abkühlen in ihre Komponenten zu entmischen. Kunststoffe mit solchen Strukturen haben oft ganz andere Eigenschaften als ihre reinen Komponenten; ein Beispiel stellt schlagzähes Polystyrol dar.

## Molekulare Motoren und Mechanik von Zellen

A. Ott

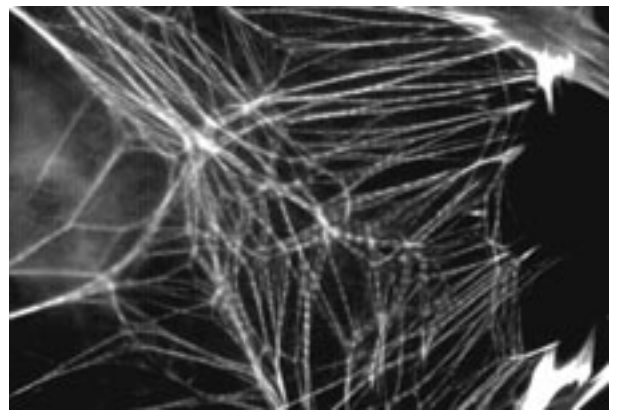
Molekulare Motoren sind Eiweißmoleküle (Proteine), die chemische Energie in Bewegung umsetzen. Sie haben eine Größe von einigen nm, also einigen Millionstel Millimetern, und sind damit die kleinsten Motoren, die es gibt. Sie unterscheiden sich wesentlich von Verbrennungsmotoren, die zum Beispiel in Kraftfahrzeugen verwendet werden. Auch im günstigsten Falle kann der Motor eines Kraftfahrzeuges nur einen Teil der im Benzin enthaltenen Energie in für uns nützliche Bewegung umwandeln; die prinzipiellen Gründe legte Carnot schon vor etwa 100 Jahren bei seiner Erforschung der Wärmekraftmaschinen offen. Interessanterweise ist die Energieausnutzung eines molekularen Motors oft viel besser als die der Wärmekraftmaschine. Die Frage ist natürlich, ob ein solch tiefes Verständnis, wie Carnot es für die Wärmekraftmaschine entwickelte, auch für molekulare Motoren erreicht werden kann.

Eine wichtige Charakterisierung eines Motors ist durch die Geschwindigkeit, die er bei einer gegebenen Kraft entwickelt, gegeben. Um diese bestimmen zu können, haben wir die Techniken

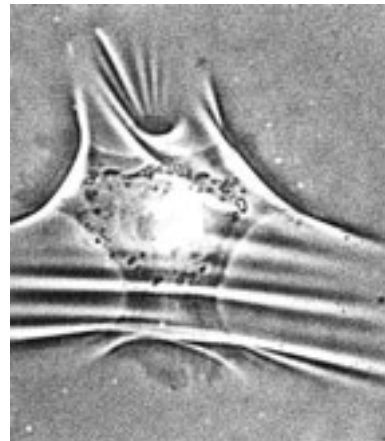
“Elektrophorese” aus der Biologie und “Mikropatterning” aus der Halbleiterindustrie kombiniert und die durch molekulare Motoren erzeugte Bewegung unter dem Mikroskop sichtbar gemacht. Das Ergebnis ist erstaunlich: der Motor kann nicht beliebig abgebremst werden, sondern seine Geschwindigkeit hat einen verbotenen Bereich. Er bewegt sich entweder vorwärts oder rückwärts, aber er hält nicht an! Die verbotene Zone wird durch eine kollektive Wechselwirkung von vielen Motoren erklärt, die - etwa wie zahlreiche Ruderer in einem Boot ohne Schlagmann - durcheinander geraten. Diese und andere Experimente unterstützten die Idee, dass es sich bei molekularen Motoren prinzipiell um eine Klasse von Motoren handelt, die sich von den uns täglich umgebenden technischen Motoren prinzipiell unterscheidet und die durch einen mechanischen Ratschenmechanismus sehr gut veranschaulicht wird. Wenn man eine Ratsche schüttelt, so fängt sie an, sich in einer bestimmten Richtung zu bewegen; molekulare Motoren werden in ähnlicher Weise von ihrem Treibstoff, den Adenosinriphosphatmolekülen (ATP) in einer Weise geschüttelt, die sie in Bewegung setzt. Wenn viele Motoren gleichzeitig unter Kraftwirkung geschüttelt werden, kommen sie aber manchmal durcheinander. Im Organismus sind molekulare Motoren omnipräsent. Innerhalb der Zelle bewegen sie sich entlang von Transportbändern und versorgen die verschiedenen funktionellen Einheiten der Zelle, mikroskopische Aufnahmen erinnern sehr an ein dicht befahrenes Straßennetz. Bei der Zellteilung transportieren molekulare Motoren die Chromosomen in die werdenden Zellen und teilen die Mutterzelle im richtigen Moment. Wie dieser so wichtige Transport, der in unserem Körper milliardenfach abläuft, sich “wie von selbst” regelt, ist bis heute ein Rätsel, das nicht einmal ansatzweise verstanden ist.

Um diese Integration der moleku-

laren Motoren in die Funktion der Zelle zu verstehen, untersuchen wir ihre Kräfteerzeugung. Zellen können sich dank der molekularen Motoren bewegen, dies ist beispielsweise für Wundheilung notwendig, wo Zellen sich gezielt auf die Wunde hinbewegen, um diese zu schließen. Dabei strukturieren sich die Transportbänder der Motoren, die Aktinfilamente; sie verbinden sich zu sogenannten “Stressfasern” und die Zelle entwickelt Kräfte (Abbildung). Gegenstand der Forschung ist es zu



a



b

Abbildungen:  
Das Aktin-Zytoskelett einer Zelle bei Kräfteerzeugung (a). Aktin ist die “Schiene”, auf der sich molekulare Motoren bewegen können. Das Zytoskelett verleiht Zellen eine gerichtete Bewegung, zum Beispiel bei der Wundheilung. Dabei polarisiert sich dieses Skelett zu sichtbaren Stressfasern. Die erzeugte Kraft wird sichtbar, wenn man die Zellen auf einem weichen Substrat kultiviert, es wirft dann Falten (b). Größe der Zellen etwa 0,02 mm.

verstehen, wie diese Kräfte im biochemischen System aufgebaut und geregelt werden. Zur Hilfestellung werden theoretische Modelle aus der Polymerphysik und Makromolekülphysik benutzt und erweitert. Kürzlich durchgeführte Experimente in unserem Labor weisen darauf hin, dass die von Zellen entwickelten Kräfte auch



bei der Kommunikation im Zellverband eine Rolle spielen. Ein Vorteil wäre die große Geschwindigkeit, denn Kräfte werden sofort übertragen, sehr viel schneller als biochemische Botenstoffe. Weitere Arbeiten sind nötig um diese Idee zu untermauern: Das Verständnis der Kopplung von Biochemie und mechanischen Kräften steht erst am Anfang, sie ist ein typisch interdisziplinäres Gebiet.

### Einzelmolekülspektroskopie

*J. Köhler*

In den letzten Jahren ist es möglich geworden, in Festkörpermatrizen einzelne Verunreinigungsmoleküle zu detektieren und zu spektroskopieren. Um sich diesen Grad der Verdünnung anschaulich vorzustellen, kann man folgendes Gedankenexperiment machen. Löst man ein Stück Würfelzucker im gesamten Wasser der Erde auf, so enthält bei homogener Durchmischung jeder Liter Wasser immer noch 20 Zuckermoleküle. Unter bestimmten Bedingungen ist es möglich,

mit der Einzelmolekülspektroskopie auch einzelne Proteine zu untersuchen. In der Abbildung ist eine Laserfluoreszenzaufnahme von einzelnen Proteinkomplexen gezeigt, mit denen Purpurbakterien Licht für die Photosynthese sammeln. Diese erfüllen die gleiche Funktion wie eine Solarzelle. Die Aufnahme ist in Form eines "Gebirges" dargestellt, in der die Höhe die Intensität der emittierten Fluoreszenz anzeigt. Jeder Gipfel resultiert von einem einzigen Proteinkomplex.

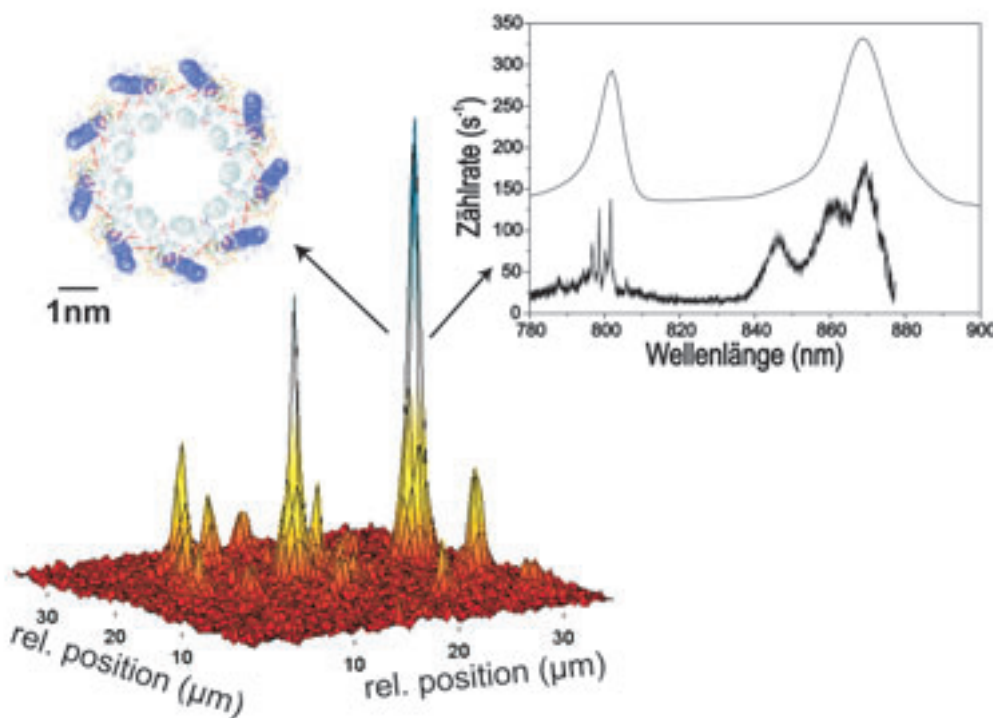
Der Bildausschnitt hat eine Größe von  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ . Die innere Struktur der Proteinkomplexe, die nur etwa 5 nm groß sind, ist unter dem normalen Lichtmikroskop nicht auflösbar. Sie lässt sich nur mit Röntgenbeugungsexperimenten bestimmen und ist links oben dargestellt. Das Laserfluoreszenzmikroskop erlaubt aber die Aufnahme eines Spektrums einzelner Proteine (rechts oben). Das Spektrum, das von einer großen Zahl von Proteinen herrührt, ist praktisch strukturlos (obere Kurve). Untersucht man dagegen einzelne Eiweißkomplexe, so

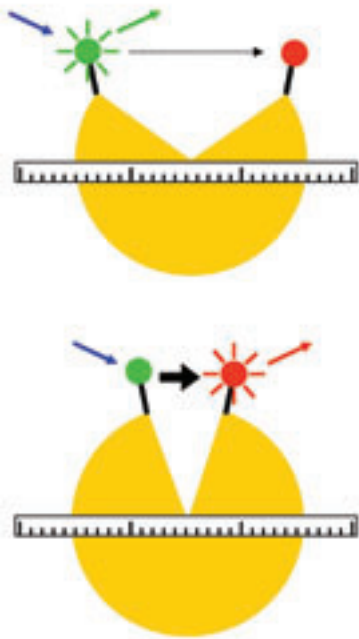
erhält man ein reich strukturiertes Spektrum, das wesentlich mehr Information enthält (untere Kurve). Dieser Unterschied kommt dadurch zustande, dass sich bei der Untersuchung des Proteinensembles die Unterschiede zwischen den einzelnen Komplexen ausmitteln. Aus den Details der Spektren einzelner Proteine erhält man wichtige Informationen über den Transport der Anregungsenergie innerhalb des bakteriellen Photosyntheseapparates. Diese Kenntnisse sind unabdingbar zum Verständnis der biologischen Funktion der Proteine.

### Proteinkonformationen

*Dagmar Klostermeier*

Für ihre biologischen Funktionen müssen Proteine in verschiedenen Formen auftreten. Diese Konformere oder Konformationen sind in der Abbildung durch die beiden unterschiedlichen gelben Formen dargestellt. Um zu verstehen, wie Bewegungen in Proteinen mit ihrer Funktion gekoppelt sind, muss man Änderungen von Abständen zwischen bestimmten Referenzpunkten im Experiment sichtbar machen. Das Prinzip der Abstandsbestimmung beruht auf einer abstandsabhängigen Wechselwirkung zweier Farbstoffmoleküle, dem Fluoreszenz-Resonanz-Energie-Transfer (FRET). Dazu werden zwei Farbstoffmoleküle, Donor (grün) und Akzeptor (rot) über biochemische Methoden an die Referenzpunkte im Protein angeknüpft. Befindet sich der Akzeptor in der Nähe des Donors, so überträgt dieser die aufgenommene Energie aus dem einfallenden Licht auf den Akzeptor, der dann Fluoreszenzlicht in einer anderen Farbe als der Donor





## Flüssigkristalline Elastomere und Ferrogele

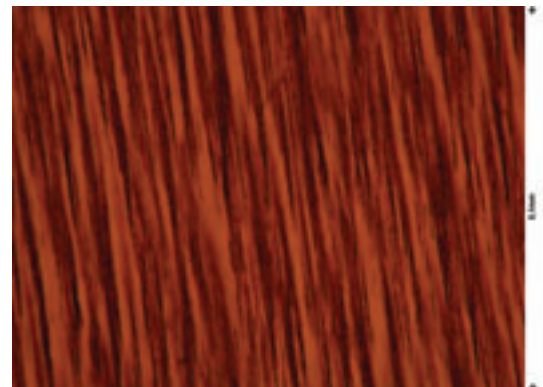
H. R. Brand

Flüssigkristalline Elastomere entstehen durch Vernetzung von Polymermolekülen, die auch flüssigkristallbildende Gruppen tragen. Flüssigkristalle sind aus dem täglichen Leben wohlvertraut aufgrund ihrer zahlreichen Anwendungen in der Gestalt von Flachbildschirmen. Bei den flüssigkristallinen Elastomeren handelt es sich um eine neue Klasse von Materialien, welche die physikalischen Eigenschaften von Flüssigkristallen kombiniert mit denen von Polymeren und darüber hinaus zusätzliche neuartige Phänomene zeigt. So kann sich die Länge der Probe eines flüssigkristallinen Elastomers bei einem Phasenübergang von der isotrop fluiden Phase in die Flüssigkristallphase um bis 300% ändern. Des Weiteren zeigen flüssigkristalline Elastomere - insbesondere im gequollenen Zustand - eine große elektromechanische Antwort; d.h. das Anlegen eines elektrischen Feldes kann sowohl zur Gestalt- als auch zur Längenänderung führen.

Diese Eigenschaften sowie ihre hohe Langzeitstabilität machen flüssigkristalline Elastomere zu einer vielversprechenden Materialklasse für Anwendungen als Aktuatoren, als Komponente künstlicher Muskeln sowie als weiche piezoelektrische Elemente, bei denen eine angelegte elektrische Spannung zu einer Verzerrung führt. Zudem werden Anwendungen für flexible Kontaktlinsen sowie in der nichtlinearen Optik untersucht.

Um Ferrogele zu erhalten, werden Polymerlösungen mit magnetischen Fluiden gemischt und dann vernetzt. Die hierzu verwandten

magnetischen Fluide sind Suspensionen von magnetischen Eindomänenteilchen, die eine empfindliche Reaktion auf kleine bis mittlere äussere Magnetfelder zeigen. Die permanent (chemisch) vernetzten isotropen Ferrogele besitzen einen statischen Schermodul und zeigen eine deutliche Reaktion auf magnetische Feldgradienten. So ist eine Verlängerung einer Ferrogel-Probe um 40% in moderaten Feldgradienten leicht erzielbar. Daneben können durch geeignete Feldgradienten auch starke Krümmungen einer Probe beobachtet werden. In jüngster Zeit ist es in Zusammenarbeit mit einer Gruppe aus Strasbourg gelungen, anisotrope Ferrogele herzustellen. ■



Die Abbildung zeigt eine Aufnahme im Polarisationsmikroskop. Die Höhe des Bilds entspricht 100  $\mu\text{m}$ . Deutlich sind faserartige längliche Strukturen parallel zur Vorzugsrichtung zu erkennen. Bei möglichen Anwendungen von Ferrogelelen ist - wie bereits bei flüssigkristallinen Elastomeren - an weiche Aktuatoren und künstliche Muskeln zu denken.

aussendet. Mit diesem "molekularen Lineal" kann man Abstände von Nanometern innerhalb von Proteinen bestimmen. Besondere Enzyme, die sogenannten Helikasen katalysieren die Entwindung von doppelhelikalen Bereichen in Nukleinsäuren unter Verbrauch von ATP. Wir setzen FRET an einzelnen Helikasemolekülen ein, um herauszufinden wie diese molekularen Maschinen die chemische Energie aus der ATP-Spaltung für die mechanische Arbeit des Entwindens von Ribonukleinsäuren nutzen.

# Nichtlineare Dynamik und Struktur- bildung



Was ist Nichtlineare Dynamik (= Bewegung)? Und warum ist das ein aktuelles Forschungsgebiet? Die folgenden Beispiele sollen die Bedeutung in ganz verschiedenen Bereichen der Natur, Wissenschaft und Technik zeigen.

Wir beginnen ganz einfach, nämlich mit periodischen Schwingungsvorgängen. Als Beispiel kann ein gewöhnliches Pendel dienen. Für kleine Ausschläge ist seine Schwingungsdauer - wie Galilei als erster erkannte - unabhängig vom maximalen Ausschlag (=Amplitude). Man sagt, das Pendel verhält sich linear. Das wird durch die mathematische Beschreibung besonders durchsichtig, aber man kann es auch anschaulich machen: Wenn man die Bewegung mit einer bestimmten Amplitude kennt, kann man alle anderen Bewegungen durch einfache Umskalierung des Winkels, also Multiplikation mit einem Faktor, erschließen. Diese Eigenschaft lässt sich auf lineare Schwingungsvorgänge mit mehreren Freiheitsgraden - z.B. mehrere Pendel, die durch geeignete Federn gekoppelt sind - erweitern. Alle diese Bewegungen lassen sich als eine Kombination von unabhängigen Schwingungen, von denen jede skaliert werden kann, beschreiben. Damit kann die Bewegung, auch wenn sie auf den ersten Blick ziemlich komplex erscheinen mag, einfach beschrieben werden: sie ist regelmäßig und präzise voraussagbar.

Tatsächlich verhält sich das Pendel nicht wirklich linear, was sich daran zeigt, dass die Schwingungsdauer mit zunehmender Amplitude doch zunimmt. Diese Zunahme ist zunächst (bei nicht zu großen Amplituden) sehr sanft. Christiaan Huygens hat den Effekt als erster erkannt und 1673 geschrieben, dass die Schwingungsdauer eines Pendels, das mit einer Amplitude von 60 Grad schwingt, sich zur Schwingungsdauer bei kleiner Amplitude verhält wie 34 zu 29. Wenn die Amplitude allerdings gegen 180 Grad geht (das funktioniert natürlich nur mit einer starren Pendelstange) geht die Schwingungsdauer gegen Unendlich. Dann wird der Effekt also sehr stark. Wenn man stark schwingende Pendel wiederum koppelt, dann treten ganz neue Effekte auf: Einerseits das Phänomen der Lokalisierung, bei dem sich die Schwingungsenergie spontan von mehreren gleichartigen Schwingern auf einen (oder

wenige) konzentriert. Um dies zu beobachten, reichen in der Tat schon zwei gekoppelte Pendel aus. Andererseits das Phänomen des Chaos, welches auf Unvoraussagbarkeit hinausläuft. Man sagt auch, das System ist (permanent) instabil, d.h. kleine Störungen wachsen mit der Zeit immer an. Diese Phänomene sind auch in elektrischen, optischen und vielen anderen schwingenden Systemen in ganz ähnlicher Form zu beob-

Lorenz Kramer

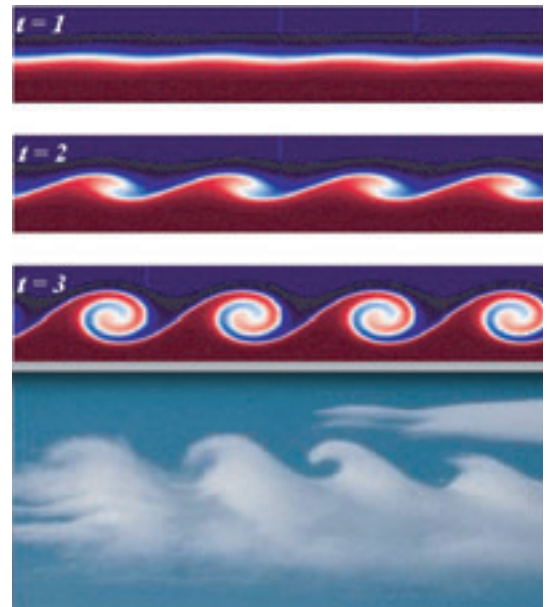


Abb.1: Das Bild zeigt im oberen Teil drei aufeinanderfolgende Schnappschüsse von Simulationen zur Kelvin-Helmholtzinstabilität (siehe Text). Rot ist das Wasser und blau die von links nach rechts strömende Luft. Im unteren Teil eine Wolkenbildung, die eine Kelvin-Helmholtzinstabilität an der Grenzfläche von gegeneinander strömenden Luftschichten erkennen lässt.

Bild oben (v.l.n.r.):  
F. Busse,  
W. Pesch,  
I. Rehberg,  
L. Kramer,  
F. G. Mertens,  
H. Schamel



achten und Gegenstand der Forschung.

Übrigens ist die Erzeugung einer Schwingung immer ein nichtlinearer Vorgang. Schwingungserzeuger sind beispielsweise aus der Elektronik (Sender), Optik (Laser), Akustik (Musikinstrumente) und in lebenden Systemen (biologische Uhren, Herzschlag) bekannt. Der Vorgang der Schwingungserzeugung beinhaltet eine sogenannte "spontane Symmetriebrechung", denn aus einem System, in das kontinuierlich Energie eingefüttert wird, kommt ein zeitlich moduliertes Signal heraus. Typisch für solche Vorgänge ist ein Schwellenverhalten, d.h. unterhalb einer gewissen Stärke des Energiestroms passiert gar nichts. An der Schwelle wird der Ausgangszustand instabil und das System geht in den schwingenden Zustand über. Die Amplitude kann danach stetig anwachsen oder aber auch einen Sprung machen. In letzterem Fall darf man erwarten, dass die Schwingung bei nachfolgender Verkleinerung des Energiestroms auch unterhalb der Schwelle noch erhalten bleibt. Es gibt also eine Aufwärts- und eine (kleinere) Abwärtsschwelle. Hier zeigt sich eine andere Eigenschaft von nicht-

linearen Systemen: unter den gleichen Bedingungen können verschiedene Zustände eingenommen werden, je nach Vorgeschichte.

Spontane Symmetriebrechung über eine Instabilität gibt es in vielerlei Varianten und ist von allgemeiner Bedeutung. Hat man z.B. zwei identische gekoppelte nichtlineare Schwinger (beispielsweise Pendel), so ist der einfachste Zustand der, bei dem beide mit genau gleicher Amplitude parallel zueinander schwingen. Diese symmetrische Situation kann aber unter geeigneten Bedingungen instabil werden. Danach schwingen die Oszillatoren ohne einfache Symmetriebeziehung. Die oben angesprochene Lokalisierung, also Ausbildung einer Schwingung mit großer und einer mit kleiner Amplitude ist ein Beispiel dafür. Auch dieser Übergang kann nur abrupt an einer Schwelle passieren. Übrigens ist das einfachste System mit spontaner Symmetriebrechung die Wippe

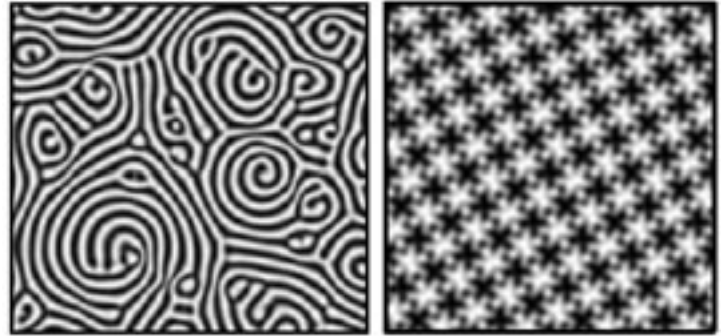


Abb. 2: Links: Schnappschuss der Simulation eines räumlich chaotischen Musters ("Spiraldefektchaos") bei thermisch getriebener Konvektion. Rechts: regelmäßiges Strömungsmuster bei "periodisch modulierter Schwerkraft". Dieses wird durch rasches Auf-/Ab-Schwingen des Gefäßes erzeugt ("Faradayinstabilität"). (Brausch/Pesch)

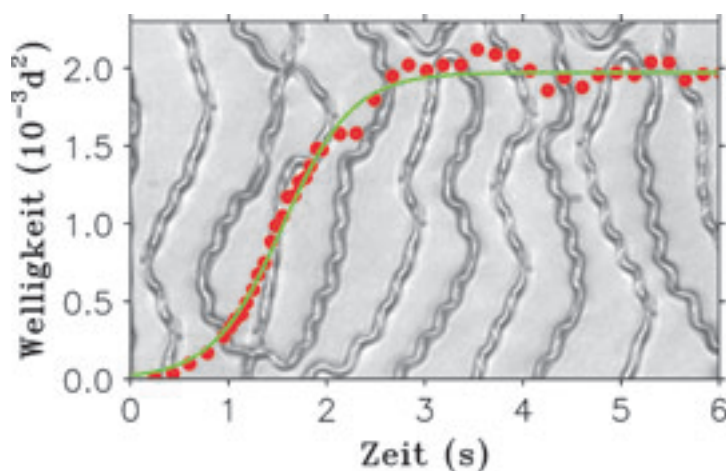


Abb. 3: Das graue Hintergrundbild zeigt ein neu entdecktes Muster, welches entsteht, wenn an eine Flüssigkristallschicht eine Wechsellspannung angelegt wird. Das Besondere hier ist das wellenförmige Aussehen der einzelnen Linien, woraus der Namen "Korkenzieher-Muster" abgeleitet ist. Die roten Messpunkte zeigen die zeitliche Entwicklung der Korkenzieher aus geraden Linien heraus, was z.B. dadurch geschieht, dass die Frequenz der angelegten Wechsellspannung bei ursprünglich geraden Linien plötzlich erniedrigt wird. Die "Welligkeit" ist ein Maß für das Abweichen von einer geraden Linie (Amplitude der Welle). Die grüne Kurve beschreibt die Anpassung der Welligkeit an ein universelles Gesetz. (de Lozar/Schöpf/Rehberg)

auf dem Kinderspielplatz. Selbst wenn die beiden Kinder an den Enden genau gleich schwer sind und genau symmetrisch zueinander sitzen, kann die Wippe ohne Abstützen nicht in der symmetrischen (also waagerechten) Lage gehalten werden. Eine Seite wird stets sinken und die andere steigen weil der Schwerpunkt des Systems höher als der Drehpunkt liegt und durch Absenken einer Seite die potentielle Energie gesenkt wird. Welche Seite sinkt und welche steigt hängt von (beliebig) kleinen anfänglichen Störungen ab.

Jetzt kommen wir zu Systemen, die aus vielen identischen gekoppelten Untersystemen ("Teilchen") bestehen. Hierbei denken wir insbesondere an normale Materie, die ja aus vielen gleichartigen Atomen oder Molekülen aufgebaut ist. Aber die Teilchen können auch größer und selbst schon aus vielen Molekülen aufgebaut sein, wie z.B. bei Emulsionen, wo kleine Teilchen in einer Lösung schwimmen. Auch sogenannte granulare Medien kommen in Frage, wofür Sand das Paradebeispiel ist. Die

Dynamik kann auch "innere Freiheitsgrade" wie elektrische, magnetische oder optische Eigenschaften der Untersysteme betreffen. Wenn die Teilchen eine anisotrope Gestalt haben, z.B. längliche Stäbe, dann muss auch die Orientierung berücksichtigt werden. Beispiele für Systeme mit einer Orientierungsordnung sind Flüssigkristalle, die aus länglichen Molekülen oder Molekülverbänden bestehen.

Bei solchen ausgedehnten Systemen kann und will man normalerweise nicht das Verhalten des einzelnen Teilchens, sondern geeignete gemittelte, beobachtbare Eigenschaften beschreiben. Dann kann man in den meisten Fällen die schnelle ungeordnete Dynamik, die man nicht im Detail beobachten kann, durch eine "Temperatur" erfassen und von der überlagerten systematischen Bewegung abtrennen. Für die Beschreibung der systematischen Dynamik spielt der mikroskopische Aufbau oft keine direkte Rolle mehr: Das System kann in sehr universeller Weise als Kontinuum beschrieben werden. In ausgedehnten Systemen manifestieren sich Schwingungsphänomene als Wellen. Auch Wellen können unter vielen Bedingungen als ein lineares Phänomen betrachtet werden, aber wie bei den Schwingungen ist zumindest ihre

Entstehung manifest nichtlinear. Das einfachste kontinuierliche Medium ist eine gewöhnliche Flüssigkeit oder ein Gas (gemeinsam als "Fluide" bezeichnet, um sie von den Festkörpern abzusetzen). Sehr interessante dynamische Phänomene spielen sich an der Grenzfläche von zwei solchen Fluiden ab. Sie sind allen bekannt weil  $2/3$  der Erdoberfläche damit bedeckt ist. Die Rede ist von Meereswellen. Sie entstehen durch eine symmetriebrechende Instabilität, wenn Wind oberhalb einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit (Schwelle) über die zunächst perfekt glatte Wasseroberfläche streicht. Der Mechanismus ist der gleiche, der einem Flugzeug mit dem oben gewölbten Flügelprofil den Auftrieb verleiht: Wenn die Oberfläche an einer Stelle nach oben ausgelenkt ist, so greifen die Auftriebskräfte dort an und versuchen die Auslenkung zu verstärken. Die Auslenkung nach oben muss durch Absenkung in unmittelbarer Nachbarschaft kompensiert werden. Man kann einsehen, dass, wenn die destabilisierenden Kräfte groß genug sind um die Schwerkraft und die Oberflächenspannung des Wassers zu überwinden, eine räumlich periodische Modulation der Oberfläche entsteht. Einfache Modellrechnungen geben als Schwelle für die Wind-

geschwindigkeit ca.  $6.6 \text{ m/s}$ . Die dabei entstehenden Wellen haben eine Wellenlänge von nur ca.  $1.7 \text{ cm}$ . Dies ist die windgetriebene Kelvin-Helmholtz Instabilität. Abb. 1 zeigt im oberen Teil drei Schnappschüsse einer Computersimulation der Destabilisierung der Oberfläche. Wie man sieht, schließt sich an die erste Destabilisierung (ganz oben, linearer Bereich) sehr schnell ein Aufsteilen und Überschlagen der Wellen an, was natürlich stark nichtlineare Prozesse sind. Das Phänomen ist auch in der Atmosphäre wichtig, wenn Luft mit unterschiedlicher Temperatur und Feuchtigkeit übereinander gleitet. Dann gibt es Wolkenformationen wie in Abb. 1 unten gezeigt. Analoges gilt für interne Wellen im Meer, wobei sich die Wasserschichten insbesondere durch den Salzgehalt unterscheiden können.

Die wohlbekanntesten, viel längeren Oberflächenwellen entstehen aus den kurzwelligen Kelvin-Helmholtzwellen durch nichtlineare Prozesse, die ähnlich dem Lokalisierungseffekt bei den gekoppelten Pendeln wirken. Tatsächlich ist die Meeresoberfläche, wie man sie von einem Flugzeug aus sieht, aber sehr ungeordnet, d.h. in einem weiteren Sinne chaotisch. Dieses Chaos in räumlich ausgedehnten Systemen erinnert entfernt an die Turbulenz im Innern von schnell fließenden Gewässern und ist Gegenstand der Forschung.

Am Physikalischen Institut wird eine Vielzahl von nichtlinearen dynamischen Phänomenen und besonders Instabilitäten, die zu selbstorganisierten raumzeitlichen Mustern führen, experimentell und theoretisch untersucht. Triebkraft ist die Suche nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, die sich durch eine universelle theoretische Beschreibung manifestieren und die zahlreiche Anwendungen in ganz verschiedenen Bereichen ermöglichen. Die experimentellen Techniken sind außerordentlich vielfältig und die theoretischen Methoden

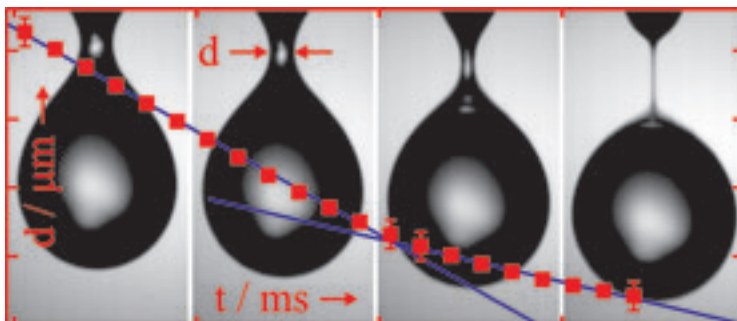


Abb. 4: Noch eine Anwendung der nichtlinearen Dynamik: Der Prozess der Ablösung eines Tropfens (Glycerin-Wasser Gemisch) von einer dünnen, im Bild nicht sichtbaren Rohrspitze, aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (zeitlicher Abstand der Bilder:  $1 \text{ ms}$ ). Im darüberliegenden Diagramm ist der minimale Halsdurchmesser als Funktion der Zeit aufgetragen. Man sieht zwei unterschiedliche Bereiche. Solange der Hals noch einigermaßen breit ist, kann die Trägheit der Flüssigkeit beim Herausfließen aus dem Hals vernachlässigt werden. Im späteren Bereich nimmt die Beschleunigung der Flüssigkeit stark zu, so dass die Trägheit relevant wird. Das Verhältnis der beiden Steigungen ist eine universelle Größe also für alle Flüssigkeiten gleich. (Rothert/Richter/Rehberg)

reichen von anspruchsvollen analytischen Verfahren bis zur Computersimulation. Die Untersuchung der universell einsetzbaren Gleichungen, welche meistens nichtlineare partielle Differentialgleichungen darstellen, spielt eine wichtige Rolle.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf Konvektionsinstabilitäten in einfachen und komplexen Fluidschichten, bei denen spontan raumzeitlich strukturierte Strömungsmuster entstehen. Bei der thermischen Konvektion wirken Auftriebskräfte, die als Folge von Dichteunterschieden aufgrund eines äußeren Temperaturgradienten auftreten. Ein Beispiel dafür ist in den Simulationen in Abb. 2, links, zu sehen (rechts eine andere strukturbildende Instabilität). Solche Effekte spielen im Erdinneren (Mantelkonvektion), den Ozeanen und in der Atmosphäre, sowie auch auf anderen Planeten und in der Sonne eine große Rolle. Sie werden insbesondere von den Professoren Busse und Pesch theoretisch bearbeitet. Bei Elektrokonvektion wirken äußere elektrische Felder auf spontan entstehende elektrische Raumladungen. Dies tritt insbesondere in Flüssigkristallen auf und wird in den Gruppen Rehberg experimentell sowie Brand, Kramer und Pesch theoretisch untersucht. Ein verwandtes experimentelles Beispiel ist in Abb. 3 gezeigt. In der Gruppe Rehberg werden u.a. noch granulare Medien und sogenannte Ferrofluide untersucht. Letztere sind Suspensionen von sehr kleinen ferrromagnetischen Teilchen. Einen Eindruck von der Vielfältigkeit und Relevanz geben die Abb. 4 und 5. In den Gruppen Brand und Kramer werden noch zahlreiche weitere Instabilitäten in Flüssigkristallen, Polymeren und anderen komplexen Fluiden theoretisch untersucht, teilweise parallel zu entsprechenden Experimenten in der Gruppe W. Köhler.

Das oben besprochene Lokalisierungsphänomen führt in manchen, effektiv eindimensionalen Sys-

temen, wie z.B. gewissen Makromolekülen, dazu, dass Energie in gebündelter Form als "Solitonen" übertragen wird. Solche Objekte sowie ihre Verallgemeinerung auf zwei Dimensionen werden in der Arbeitsgruppe Mertens analytisch und numerisch untersucht. Nichtlineare dynamische Phänomene stehen auch in der Plasma-physik, wie sie in der Gruppe Schamel von theoretischer Seite betrieben wird, im Vordergrund. Plasmen sind Fluide, bei denen die Atome in elektrisch geladene Konstituenten (Ionen und Elektronen) aufgespalten sind. Sie treten in technischen Anwendungen (z.B. kontrollierte Kernfusion, Plasmatechnologie), im Weltraum, in Teilchenbeschleunigern und grundsätzlich in Materie bei sehr hohen Temperaturen, wie z.B. in der Sonne auf. Schließlich sei erwähnt, dass inter-

essante nichtlineare dynamische Phänomene mit spontaner Musterbildung auch noch in anderen Arbeitsgruppen auftauchen, z.B. in dem in der Arbeitsgruppe Eska untersuchten suprafluiden Helium. Anknüpfungen gibt es zur Biophysik (Arbeitsgruppe Ott), wo die Differenzierung von zunächst identischen Zellen, die ja auch einen spontanen Symmetriebruch darstellt, bei der Regeneration von einfachen Organismen untersucht wird. Überhaupt ist die Biologie voll von Musterbildungsprozessen, die in Bayreuth verstärkt betrachtet werden sollen. Man denke nur an Zebras, Marienkäfer und Korallenfische. Aber auch die Nerven-erregung und -leitung sowie Informationsverarbeitung im Gehirn stellen komplexe nichtlineare Prozesse dar, die mit physikalischen Methoden erforscht werden können. ■

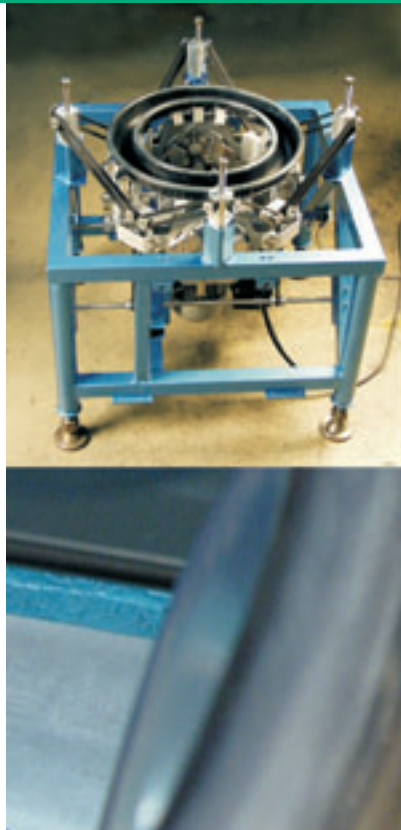


Abb. 5: Ein aus der Praxis abgeschautes Projekt aus dem Bereich der granularen Medien: Kleinteile wie Hülsen, O-Ringe usw. werden im industriellen Bereich oft durch sogenannte Schwingförderer oder Rüttler in großen Mengen transportiert. Dabei werden z.B. wendelförmige Führungskanäle in geeignete Schwingungen versetzt. Die darin dicht liegenden Teile fangen dann spontan an in eine Richtung zu wandern (normalerweise ist eine Aufwärtsbewegung in der Wendel erwünscht). Verstanden sind die Prozesse noch recht wenig. In dem Projekt wird ein kreisförmiger Kanal, der "Bayreuther Ring" (links oben im Bild) in eine Kombination aus Auf-/Ab- und Rotationsschwingungen versetzt. Neben der Wanderbewegung der hier verwendeten Glaskügelchen von 1 mm Durchmesser zeigt sich eine weitere Instabilität, die zu Oberflächenwellen führt (siehe den vergrößerten, jetzt gefüllten Kanalausschnitt im Hauptbild). (Rouijaa/Krülle/Rehberg)



# Physikdidaktik in Bayreuth



Sigrid Weber

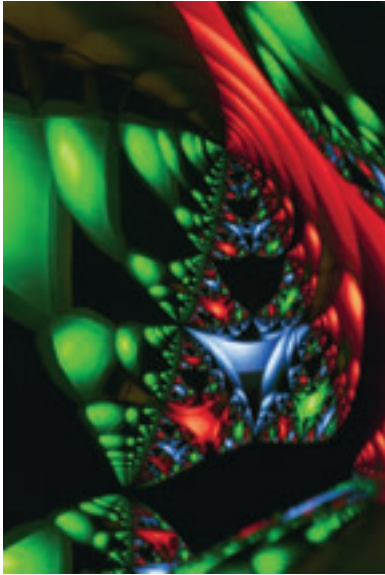


Abb. 1:  
Vielfachreflexionen  
dreifarbigen Lichts  
an vier aufeinander-  
gestapelten verspie-  
gelten Kugeln, erzeu-  
gen eine sog. fraktale  
Struktur.

Die Fachdidaktik Physik ist ein eigenständiges Fach. Sie kann als pädagogisch orientierte Fachdisziplin angesehen werden. Einen Schwerpunkt bildet die theoretische und praktische Fachdidaktikausbildung im Rahmen der Lehramtsstudiengänge für die Schularten Grund-, Haupt-, Real-, Berufsschule und Gymnasium. Das Tätigkeitsfeld erstreckt sich des Weiteren von der Fortbildung von Lehrkräften aller genannten Schularten, über Nachwuchsförderung und Öffentlichkeitsarbeit allgemein bis hin zur fachdidaktischen Forschung. Schwerpunkte der lokalen didaktischen Forschungsarbeit liegen auf dem Gebiet der Förderung und Bewertung des Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnologien in Lehr-Lern-Prozessen des Physikunterrichts sowie bei der Förderung des Physikunterrichts anhand ausgewählter Maßnahmen zur Interesseweckung bzw. -steigerung. Salopp gesagt fällt Interesse nicht vom Himmel, jede Interessiertheit basiert auf direkten persönlichen Erfahrungen mit Interesse erregenden Objekten. Kann im Unterricht nicht auf vorhandene Erfahrungen aufgebaut werden, sind geeignete zu schaffen. Bereits bei Lehramtsstudierenden muss die Bereitschaft geweckt werden, im späteren Unterricht jede Wissensvermitt-

lung auf solid fundierte Erfahrung zu gründen sowie die Lernenden zu schulen, erlerntes Fachwissen anzuwenden. Dies erfordert von Lehrenden nicht nur hohe fachliche Kompetenz sondern auch permanentes Engagement, das letztendlich Interesse und Begeisterung für naturwissenschaftliche Probleme wecken kann.

Möglichkeiten zur Selbsttätigkeit von Lernenden bieten sowohl die neuen Medien - Stichwort virtuelle Realität - als auch Experimente. In der Physikdidaktik sind dazu u.a. virtuelle Experimente entwickelt worden, die über die Homepage der Physikdidaktik abrufbar sind: <http://didaktik.phy.uni-bayreuth.de/>. Auch manche Ergebnisse moderner physikalischer Forschung können als Keim zur Interesseweckung bei Jugendlichen aufbereitet werden. Man nehme wenige Beispiele, die zeigen, dass Physik Spass macht und interessant ist, und würze mit speziellen physikalischen Fragestellungen, die u.a. Aspekte der Umwelterziehung thematisieren. Effekte aus dem Gebiet der nichtlinearen Dynamik bzw. der Komplexen Systeme sind für diese Vorhaben

prädestiniert.

Unter diesem Gesichtspunkt sind Experimente entwickelt worden, die die alte paradigmatische Sichtweise, alles ist prinzipiell vorher-sagbar, ad Absurdum führen. Die Vorstellung von Heranwachsenden muss heute Raum für Unvorher-sagbares, für Instabilitäten und generell Konsequenzen nichtlinearer Wechselwirkungen haben. Manche Phänomene bestechen sowohl durch ihre Ästhetik als auch durch ihren Alltagsbezug, wie beispielsweise die in Abb. 2 gezeigte Lawinemaschine. Ein anderes vom Aufbau her einfachstes Experiment erzeugt die in Abb. 1 dargestellten Effekte. Diese und weitere Effekte können beim Nachbau in Projekten, Arbeitsgemeinschaften, Wahlkursen und Facharbeiten faszinieren. ■

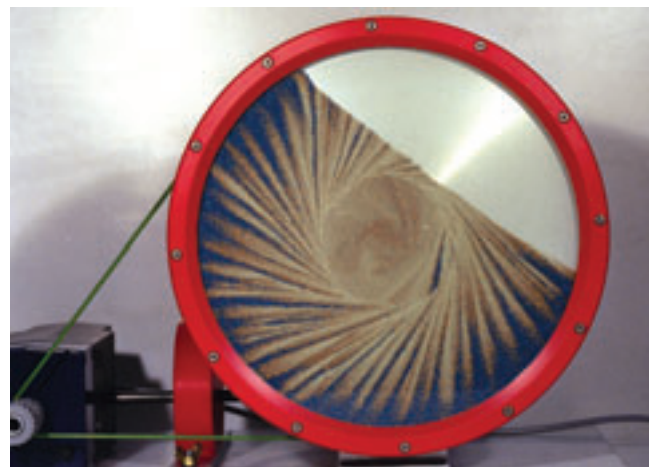


Abb. 2: Quasizweidimensionale Mischtrommel gefüllt mit drei Granulaten unterschiedlicher Farbe, Korngröße und Kornstruktur. Lawinenabgänge innerhalb der rotierenden Trommel erzwingen einen Separationsprozess, der in Streifenbildung mündet.

# Studiengänge

Hans Braun

In Bayreuth besteht die Möglichkeit, Physik mit Abschluss Diplom in drei unterschiedlichen Studienrichtungen zu studieren: Physik, Technische Physik und Biophysik. Daneben werden Studiengänge für das Lehramt an Berufs-, Real-, Haupt- und Grundschulen und Gymnasien angeboten.

Der Diplomstudiengang Physik bereitet auf die Tätigkeit des Diplom-Physikers in forschungsbezogenen Berufsfeldern vor, Richtung "Technische Physik" des Diplom-Studienganges Physik auf die Tätigkeit in überwiegend anwendungsorientierten Berufsfeldern. Diese Studienrichtung unterscheidet sich von der mehr grundlagenorientierten Studienrichtung Physik wesentlich erst nach dem viersemestrigen Grundstudium. Bis zur Vordiplomprüfung ist ein Wechsel der Studienrichtung innerhalb des Studienganges Physik daher ohne Schwierigkeiten möglich. Die Studienrichtung Biophysik des Diplomstudienganges Physik bereitet sowohl auf die Tätigkeit in der Grundlagenforschung als auch in der anwendungsbezogenen Entwicklung vor. Ziel dieser Studienrichtung ist es, neben einem vollständigen Physikstudium auch Grundkenntnisse aus dem biologischen Bereich zu vermitteln. Studienordnungen und Studienpläne sind so gestaltet, dass das Studium zum Wintersemester aufgenommen werden sollte. Die Studienpläne sehen für die Durchführung des Studiums einschließlich der Diplomarbeit zehn Semester vor.

An der Universität Bayreuth werden Lehramtsstudiengänge für Physik am Gymnasium (Physik als vertieftes Fach in Kombination mit

einem der Fächer Mathematik, Informatik, Biologie oder Erdkunde), an Realschulen (Physik in Kombination mit Mathematik oder Informatik), für das Lehramt an beruflichen Schulen mit der Fachverbindung Metalltechnik/Physik und das Lehramt an Grund- und Hauptschulen (Physik im Rahmen der Didaktik) angeboten. Hier wird eine breite fachliche und fachdidaktische Ausbildung vermittelt.

Ein Studienaufenthalt im Ausland ist ein guter Weg, die Kenntnisse einer fremden Sprache zu verbessern und eine andere Kultur kennen zu lernen. Ein Auslandsaufenthalt bereits während des Studiums wird daher empfohlen. Zu diesem Zweck hat die Universität Bayreuth Partneruniversitäten im Ausland gewonnen; an ihnen können unsere Studenten Studienleistungen erbringen, die hier aner-

kannt werden. Für Studierende der Physik werden spezielle Austauschprogramme mit den Universitäten Paris VII und St. Andrews (Schottland) angeboten. Außerdem ist das Physikalische Institut Mitglied im "European Mobility Scheme for Physics Students", dem über hundert Physikalische Institute an anderen europäischen Universitäten angehören. Zur Vereinfachung der gegenseitigen Anerkennung von Studienleistungen wird der Studienaufwand mit Credit Points bewertet. Alle Lehrveranstaltungen der Physik werden im Vorlesungsverzeichnis der Universität aufgeführt. Außerdem stellt das Physikalische Institut vor jedem Semester ein kommentiertes Vorlesungsverzeichnis im Internet zur Verfügung, welches zusätzliche Informationen zu den jeweiligen Veranstaltungen enthält. ■

Weitere Informationen:

<http://www.uni-bayreuth.de/departments/physik/lehre/>

## Lehrerfortbildung

1976 Der Laser und seine Anwendung  
 1977 Physik des Halbleiters  
 1978 Theorie der chemischen Bindung  
 1979 Phänomene bei tiefen Temperaturen  
 1980 Vorgänge der elastischen Streuung  
 1981 Ausgewählte Kapitel der modernen Spektroskopie  
 1982 Optische Signalübertragung und Speicherung  
 1983 Energiewandlung und Speicherung  
 1984 Phasenübergänge und Instabilitäten  
 1985 Das Wetter  
 1986 Elementarteilchen  
 1987 Optik  
 1988 Physik der Polymere  
 1989 Supraleitung von Metallen: Grundlagen, neue Entwicklungen und technische Anwendungen

1990 Moderne Aspekte der Astrophysik  
 1991 Magnetfelder  
 1992 Moderne Konzepte bei der Energiegewinnung  
 1993 **Messen in der Physik**  
 1994 Raumzeitliche Musterbildung in einfachen und komplexen Flüssigkeiten  
 1995 Moderne Konzepte in der Halbleiterphysik  
 1996 Neue Materialien - eine Herausforderung an Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften  
 1997 Neuere Ergebnisse aus der Kosmologie  
 1998 Neuere Entwicklungen in der Physik: Von intellektueller Neugier bis hin zur technologischen Herausforderung  
 1999 Von einfachen Experimenten zu wichtigen Anwendungen der Physik  
 2000 25 Jahre Lehrerfortbildung in Bayreuth  
 2001 Moderne Methoden der Biophysik  
 2002 Quantenmechanik: Erfolgreiche experimentelle Bestätigungen und "paradoxe" Interpretation



# Angewandte Informatik

Die im Jahr 2002 gegründete Fachgruppe Informatik in der Fakultät für Mathematik und Physik trägt mit ihrer Anwendungsorientierung zur Profilbildung der Universität Bayreuth bei. Ein erster Meilenstein ist der zum Wintersemester 2002 begonnene Bachelorstudiengang Angewandte Informatik. Auch in der Forschung bildet die Angewandte Informatik eine wichtige Ergänzung zu den bestehenden Schwerpunkten der Universität.

*Fachgruppe Informatik  
vordere Reihe (v.l.):  
Prof. Klaus Schittkowsky, Sascha Hunold, Carsten Scholtes, Prof. Reinhard Laue, Prof. Andreas Henrich, Prof. Thomas Rauber, Bernhard Daubner  
mittlere Reihe (v.l.):  
Matthias Korch, Marco Höbbel, Dr. Christian Zillober, Günter Robbert, Bernd Schlesier, Martin Eisenhardt, Simon Melzner  
hintere Reihe (v.l.):  
Thomas Pries, Monika Glaser, Dr. Axel Kohnert, Dr. Wolfgang Müller, Karlheinz Morgenroth  
Foto: Peter Kolb*

Die Gesellschaft für Informatik e.V. charakterisiert ihre Disziplin unter anderem über die typischen Berufsfelder und Einsatzbereiche. Hierzu gehören

- die Analyse, Konzipierung und Konfiguration von Hard- und Softwaresystemen,
- deren Einbettung in bestehende Umgebungen,
- die Planung und Organisation entsprechender Entwicklungs- und Einführungsprozesse,
- die Anpassung von System- und Anwendungssoftware,
- das Erschließen neuer Einsatzgebiete und die Schulung.

Der Informatik kommt damit in Forschung und Lehre eine immer stärkere Bedeutung zu, sodass eine Universität eine starke Informatik

für Entwicklungsimpulse in den Leit- und Schlüsseltechnologien der Zukunft benötigt.

## Aktuelle Trends

Die Informationstechnologie (IT) durchdringt zunehmend unseren beruflichen und privaten Alltag. Sie hat einen besonderen Einfluss auf innovative Entwicklungen im Produktions-, Handels- und Dienstleistungsbereich. Trends wie die zunehmende Vernetzung, die steigende Leistungsfähigkeit der Rechner und Netze, die Miniaturisierung der Komponenten oder die komponentenorientierte Integration der Systeme treiben diese Durchdringung voran und eröffnen neue Anwendungsfelder.

Die Innovationen in den Informations- und Kommunikationstechnologien verändern die Produkte und Dienstleistungen ebenso wie die Produktionsprozesse und die zugehörigen Produktionseinrichtungen. Seit mehreren Jahrzehnten werden bereits die Produktionsprozesse durch computer-

gestützte Management Support Systeme. Neben dieser Umgestaltung von Produktionsprozessen und Produktionsmitteln durch Computersysteme werden auch die Produkte und Dienstleistungen selbst zunehmend "intelligenter", d.h. sie enthalten Computer bzw. Computerleistungen als wesentliche Bestandteile.

Die genannten Trends stellen gleichzeitig Herausforderungen für eine Hochschule dar, die hier in den Bereichen der Aus- und Weiterbildung, der Forschung und der Kooperation eine Vorreiterrolle einnimmt. Im Folgenden soll skizziert werden, wie sich die Universität Bayreuth dieser Herausforderung stellt.

## Angebote in der Aus- und Weiterbildung

Die Universität Bayreuth setzt im Bereich der Aus- und Weiterbildung folgende Schwerpunkte:

- Studiengänge im Bereich der Angewandten Informatik, die Anwendungsgebiete adressieren, in denen die Universität Bayreuth anerkannte Schwerpunkte gebildet hat. Zu nennen sind hier die Öko- und Umweltwissenschaften, Neue Materialien, oder die Molekularen Biowissenschaften.
- Die Lehrerbildung im Bereich der Informatik, die die Ausbildungsangebote zum Lehramt in den Bereichen Mathematik, Physik und Wirtschaftswissenschaften sinnvoll ergänzt.
- Eine zielgruppenorientierte Integration von Informatikinhalten in den Aus- und Weiterbildungsangeboten der Universität Bayreuth.





Konkret besteht das Angebot derzeit aus folgenden Studiengängen und Paketen:

- Bachelorstudiengang Angewandte Informatik mit den Schwerpunkten Ingenieurinformatik, Bioinformatik und Umweltinformatik (ein entsprechender Masterstudiengang ist in Vorbereitung)
- Lehramts-Studiengänge Informatik (für Gymnasium, Realschule, Hauptschule, berufsbildende Schulen)
- Wirtschaftsinformatikausbildung im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Studiengänge (unter Federführung des in der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät beheimateten Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik)
- Zusatzqualifikation Multimedia-kompetenz (in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl Mathematik und ihre Didaktik)
- Nebenfach zur Angewandten Informatik (Neue Medien) für zahlreiche Bachelorstudiengänge

### Forschung und Entwicklung

Die inhaltlichen Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung in der Angewandten Informatik in Bayreuth liegen in folgenden Feldern:

- Management von Softwareprojekten, Software-Engineering
- Systeme zur Informationssuche
- Parallele und Verteilte Systeme
- Echtzeitsysteme und Embedded Systems
- Datenbanken und ihre Anwendung
- Multimediale Systeme und Visualisierung

Daneben liegt ein weiterer Schwerpunkt durch die organisatorische Nähe zur Mathematik in der rechnergestützten Realisierung komplexer mathematischer Verfahren. Zu nennen sind hier die Gebiete Diskrete Algorithmen und Kontinuierliche Optimierung.

Die engen Kooperationen mit den Fachgebieten Molekulare Biowissenschaften, Angewandte Naturwissenschaften sowie Geo- und Umweltwissenschaften ergeben

dabei fachliche Schwerpunkte in den Bereichen Bioinformatik, Ingenieurinformatik und Umweltinformatik:

- Die Bioinformatik behandelt u.a. Problemstellungen bei der Entschlüsselung des Erbguts und im Zusammenhang mit der Entwicklung von Arzneimitteln. Hierzu gehört die Verarbeitung genetischer Information ebenso wie die Vorhersage der dreidimensionalen Struktur eines Proteins oder die Simulation biochemischer Vorgänge.
- Im Gebiet der Ingenieurinformatik werden u.a. Problemstellungen aus den Bereichen Messen/ Steuern /Regeln, Konstruktionslehre/CAD (Computer Aided Design) oder Produktionstechnik adressiert.
- Die Umweltinformatik betrachtet Informationssysteme zur Analyse von Umweltdaten aus den Bereichen Boden, Luft und Wasser - etwa bei der Erstellung einer betrieblichen Ökobilanz. Auch die computergestützte Simulation von Ökosystemen ist Gegenstand der Umweltinformatik.

### Unternehmenskooperationen

Im Bereich der Informatik und insbesondere in den oben skizzierten Anwendungsgebieten besteht in vielfältiger Weise die Möglichkeit zur Kooperation zwischen Unternehmen und der Universität. Das Spektrum reicht von Schulungen über gemeinsam betreute Diplomarbeiten bis zu größeren gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

### Ressourcen und Kompetenzbereiche

Die Fachgruppe Informatik wurde im Jahr 2002 in der Fakultät für Mathematik und Physik gegründet. Sie besteht derzeit aus drei Lehrstühlen und zwei Professuren:

- Lehrstuhl Angewandte Informatik I (Softwaretechnik und Informationssysteme), Prof. Dr. Andreas Henrich

- Lehrstuhl Angewandte Informatik II (Verteilte und Parallele Systeme), Prof. Dr. Thomas Rauber
- Lehrstuhl Angewandte Informatik III (Echtzeitsysteme und Embedded Systems), in Besetzung
- Professur für Angewandte Informatik (Diskrete Algorithmen), Prof. Dr. Reinhard Laue
- Professur für Angewandte Informatik (Kontinuierliche Optimierung), Prof. Dr. Klaus Schittkowski

Daneben ist in den kommenden zwei Jahren die Einrichtung zweier weiterer Lehrstühle geplant:

- Lehrstuhl Angewandte Informatik IV (Datenbanksysteme)
- Lehrstuhl Angewandte Informatik V (Multimediale Systeme und Visualisierung)

Zusätzlich gibt es in anderen Fakultäten weitere informatiknahe arbeitende Professoren:

- Lehrstuhl Betriebswirtschaftslehre VII (Wirtschaftsinformatik)
- Professur für Bioinformatik

Zum Profil der Angewandten Informatik in Bayreuth gehört, dass sich neben den Lehrstühlen und Professuren der Angewandten Informatik auch in den Anwendungsgebieten zahlreiche Lehrstühle mit IT-bezogenen Themenstellungen beschäftigen. Trotz der im Vergleich zu anderen Universitäten relativ kleinen Informatik Fachgruppe kann die Universität Bayreuth durch diese Verzahnung attraktive Angebote im Bereich der Aus- und Weiterbildung sowie der Kooperation machen. ■

*Interdisziplinäre Einbindung der Angewandten Informatik an der Universität Bayreuth*



weitere Informationen im Internet unter [ai.uni-bayreuth.de](http://ai.uni-bayreuth.de)

# Angewandte Informatik I

## Softwaretechnik und Informationssysteme

Die Integration des Projektmanagements mit der Softwareentwicklung und die inhaltsbasierte Suche nach Dokumenten und Objekten bilden die beiden Arbeitsschwerpunkte des Lehrstuhls Angewandte Informatik I. Die Bedeutung des Projektmanagements für die Softwareentwicklung wird dabei aus der Tatsache deutlich, dass wesentlich mehr Softwareprojekte aufgrund von Fehlern im Projektmanagement scheitern als an technischen Schwierigkeiten. Den Hintergrund der inhaltsbasierten Suche bildet die Feststellung, dass es in der heutigen Zeit der Informationsüberflutung von essentieller Bedeutung ist, aus der unübersehbaren Fülle der Dokumente die für eine konkrete Problemstellung relevanten Dokumente effizient und mit einer hohen Präzision zu ermitteln.



*Professor Dr. Andreas Henrich, Inhaber des Lehrstuhls Angewandte Informatik I - Softwaretechnik und Informationssysteme*

Der Lehrstuhl Angewandte Informatik I wurde im Oktober 2001 eingerichtet. Seine Ausrichtung auf die Softwareentwicklung trägt der wachsenden Komplexität heutiger Softwaresysteme Rechnung. Software wird heute in interdisziplinären Teams aus Anwendern und IT-Spezialisten entwickelt. Für die Softwareentwickler reicht es dabei nicht mehr aus, eine oder mehrere Programmiersprachen zu beherrschen. Vielmehr müssen Fragen der Systemarchitektur, Analysemethoden und Verfahren zum Softwaretest beherrscht werden. Nicht zuletzt kommt einem professionellen Projektmanagement entscheidende Bedeutung zu.

Leider werden die Aufgaben der Softwareentwicklung und des Projektmanagements heute oft noch nicht einmal auf der Ebene der Entwicklungswerkzeuge integriert. Auf der einen Seite stehen die Werkzeuge zum Projektmanagement, die häufig auf Verfahren der Netzplantechnik basieren, und auf der anderen Seite stehen Softwareentwicklungs-

umgebungen, in denen Analyse- und Designdokumente, Programmtexte und Testfälle verwaltet werden. Eine Verbindung der beiden Seiten könnte aber wertvolle Unterstützung bei der Qualitätssicherung, der Projektfortschrittskontrolle und der Aufwandsschätzung liefern. Diese Integration bildet einen Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls.

Den zweiten Schwerpunkt bilden Informationssysteme, die der effizienten Verwaltung von und der Recherche in umfangreichen Datenbeständen dienen. Von besonderem Interesse ist dabei die inhaltsorientierte Suche nach den zu einer konkreten Problemstellung relevanten Dokumenten. Hierzu werden aus den einzelnen Dokumenten die inhaltsbeschreibenden Merkmale mittels Methoden der Text-, Bild-, Audio-, oder Videoanalyse extrahiert. Man spricht allgemein von einer Feature-Extraktion. Diese Features beziehen sich bei einem Text z.B. auf die in dem Text vorkommenden Konzepte, wobei Konzepte auf einer höheren semantischen Ebene angesiedelt sind als Wörter oder Zeichenketten. Im Falle von Bildern werden durch die Features z.B. Farb-, Textur-, und Formeigenschaften adressiert, die sich auf das ganze Bild oder Bildausschnitte beziehen können.

Die quantifizierten Eigenschaften werden zu einem so genannten Feature-Vektor zusammengefasst. Mit einem Anfragevektor kann dann eine Ähnlichkeitssuche auf den Feature-Vektoren der verwal-

teten Dokumente durchgeführt werden.

Im Folgenden soll nun eine Darstellung der aktuellen Lehr- und Forschungsaktivitäten in den skizzierten Themenbereichen gegeben werden.

### Lehrangebot

Das Lehrangebot des Lehrstuhls ist im Bachelorstudiengang Angewandte Informatik, im geplanten Masterstudiengang Angewandte Informatik, im Lehramtsstudiengang Informatik sowie in der Nebenfachausbildung zur Informatik angesiedelt.

Der Lehrstuhl deckt dabei - zum Teil im Wechsel mit anderen Lehrstühlen - Veranstaltungen zur Softwareentwicklung im Rahmen der Grundlagenausbildung ab. Hierzu gehören die Veranstaltungen Konzepte der Programmierung, Algorithmen und Datenstrukturen, Betriebssysteme oder Software-Engineering. Hinzu kommen Spezialveranstaltungen zur inhaltsbasierten Suche und zum Management von Softwareprojekten.

Der Lehrstuhl legt dabei großen Wert auf den Einsatz kommerziell relevanter Systeme. So werden in der Veranstaltung Software-Engineering mehrere in der Praxis verbreitete Entwicklungswerkzeuge eingesetzt. Im Bereich des E-Learning hat der Lehrstuhl für die Virtuelle Hochschule Bayern einen Kurs zum Thema Information Retrieval entwickelt.

*Prof. Dr. Andreas Henrich*

**Forschungsangebot**

**Integration von Projektmanagement und Softwareentwicklung**



Softwareentwicklung wird heute in der Regel auf Basis eines Vorgehensmodells durchgeführt. Dabei sind die einzelnen Aktivitäten, die einzusetzenden Methoden sowie die zu erstellenden Dokumente genau definiert. Auf der anderen Seite werden für das Projektmanagement Werkzeuge auf Basis der Netzplantechnik verwendet. Beide Bereiche sind leider in der Praxis nur unzureichend miteinander verknüpft und auch in der Forschung ist dieser Aspekt noch nicht hinreichend untersucht. Die Integration, die auf der konzeptuellen Ebene und auf der Ebene der Werkzeuge erfolgen muss, zielt dabei auf Aspekte wie:

- eine Unterstützung bei der Beurteilung des Projektfortschritts,
- eine teilautomatische Qualitätssicherung oder
- eine Unterstützung bei der Aufwandsschätzung, die sich im fortschreitenden Projekt kontinuierlich verfeinert.

**Inhaltsbasierte Suche / Information Retrieval**

Im Information Retrieval (IR) werden Informationssysteme in Bezug auf ihre Rolle im Prozess des Wissenstransfers vom menschlichen Wissensproduzenten zum Informations-Nachfragenden betrachtet. Dabei geht es letztlich darum, die zu einem Informations-

wunsch relevanten Dokumente zu finden. Am Lehrstuhl Angewandte Informatik I beschäftigen wir uns primär mit vier Teilaspekten des IR. Zunächst ist die Suche in strukturierten Multimedia-Daten zu nennen, die im Gegensatz zur heute üblichen Suche zu sehen ist, bei der die Dokumente als unstrukturierte Folge von Sätzen betrachtet werden. Betrachtet man aber z.B. mit Hilfe von XML strukturierte Dokumente, so ergeben sich hieraus neue Möglichkeiten die Semantik der Dokumente zu erschließen und andererseits komplexere Anfragemöglichkeiten, die in geeigneten Schnittstellen beherrschbar gemacht werden müssen.

Einen zweiten Aspekt bilden Indexstrukturen und Algorithmen zum Information Retrieval. Im Hinblick auf strukturierte Multimedia-Daten sind hier Fragestellungen zur Kombination mehrerer Relevanzkriterien von Interesse, die noch dazu oft für verschiedene Dokumententeile definiert sind. Auch heuristische Verfahren zur Ähnlichkeitsberechnung spielen aufgrund der hohen algorithmi-

schon Komplexität eine wichtige Rolle.

Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Ausnutzung von Kontextwissen zur genaueren Definition eines Informationswunschs. Wenn man sich bei der Anfragebearbeitung lediglich auf die vom Benutzer formulierte Anfrage stützt, muss man bedenken, dass diese Anfrage nur eine unvollständige Repräsentation des Informationswunschs ist. Man kann nun versuchen, Wissen über den Kontext des Benutzers mit in die Anfragebearbeitung einfließen zu lassen, um so eine höhere Präzision zu erreichen.

Abb.1 (ganz links): Aufgaben beim Management von Softwareprojekten



Abb.2 (rechts): System zur Formulierung komplexer Anfragen auf strukturierten, multimedialen Daten

Als vierten Aspekt betrachten wir schließlich die Frage, wie sich mit Hilfe des Peer-to-Peer-Paradigmas (P2P) ein verteiltes IR-System entwickeln lässt, das sich weitestgehend selbst administriert. Wichtige Aspekte dabei sind das Routing der Anfragen und Antworten, die Zusammenführung mehrerer Ergebnismengen, die Optimierung der Netzwerk-Topologie sowie die Sicherheit im P2P-Netz. ■

**Kontakt**

Universität Bayreuth  
 Lehrstuhl für Angewandte Informatik I  
 (Softwaretechnik und Informationssysteme)  
 Universitätsstraße 30  
 95447 Bayreuth  
 Tel.: 0921/55-33 13  
 Fax: 0921/55-5820  
 Internet: <http://ai1.inf.uni-bayreuth.de>  
 E-Mail: [henrich@uni-bayreuth.de](mailto:henrich@uni-bayreuth.de)

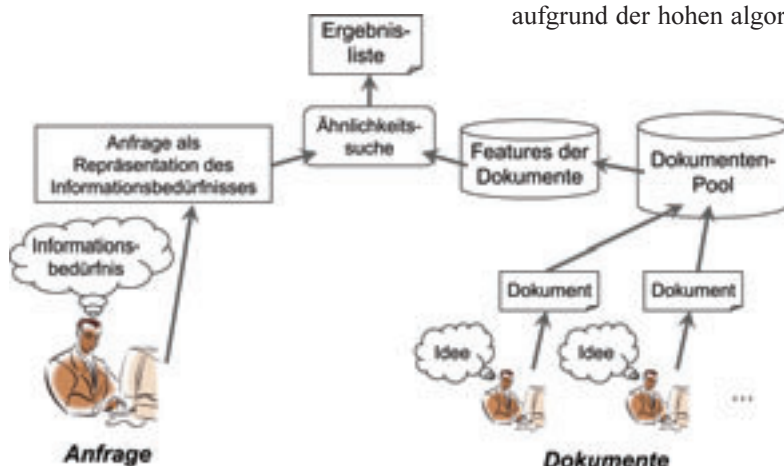


Abb.3: Grundmodell des Information Retrieval



# Angewandte Informatik II

## Rechnernetze, Parallele und Verteilte Systeme und Grid Computing

Die seit etwa 20 Jahren zu beobachtende Entwicklung von Rechnernetzen hat einen großen Einfluss auf die Informatik, da ein schneller weltweiter Datenaustausch und eine koordinierte dezentrale Verarbeitung von Daten ermöglicht wird. Dieser Beitrag beschreibt kurz die technologische Entwicklung und deren Auswirkungen und gibt einen Überblick über den aktuellen Bereich des Grid Computing.

Prof. Dr. Thomas Rauber



Prof. Dr. Thomas Rauber, Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Informatik II

Die Entwicklung im Bereich der Halbleitertechnologie führt zur Realisierung von VLSI-Schaltkreisen, die die Integration einer immer größeren Anzahl von Transistoren auf einer immer kleineren Chipfläche erlauben. Dies wird zu architektonischen Verbesserungen genutzt, wobei die prozessorinterne parallele Verarbeitung von Daten eine wesentliche Rolle spielt. Zu nennen sind dabei die schrittweise Erhöhung der Wortbreite von 8 Bit (Intel 8080) über 16 und 32 Bit auf 64 Bit (Intel IA64), die Zerlegung der Verarbeitung einer Maschineninstruktion in Teilaufgaben, so dass bei voneinander unabhängigen Instruktionen aufeinander folgende Teilaufgaben benachbarter Instruktionen parallel zueinander verarbeitet werden können (Pipelining) und der Einsatz mehrerer Funktionseinheiten, die unabhängig voneinander Instruktionen verschiedenen Typs bearbeiten können.

Neben dem Einsatz von Parallelität auf Prozessorebene gibt es seit Mitte der 70er Jahre die Tendenz, zur Durchführung von rechenzeitintensiven Simulationen aus dem physikalisch-technischen Bereich speziell für dieses Einsatzgebiet

konstruierte Parallelrechner einzusetzen, in denen mehrere Prozessoren zur Durchführung der Berechnung strukturiert zusammenarbeiten, so dass bei einer  $p$ -Prozessor-Maschine im Idealfall nur  $1/p$  der Rechenzeit einer Einprozessor-Maschine gebraucht wird. Dabei wurden seit 1997 insbesondere im Rahmen der ASCI-Initiative (Accelerated Strategic Computing Initiative) in den USA mehrere Höchstleistungs-Parallelrechner für Forschungslaboratorien entwickelt und installiert, die aus mehreren Tausend einzelnen Prozessoren bestehen und in der Lage sind, Grand-Challenge-Probleme bisher nicht bewältigbarer Größenordnung zu lösen. Abbildung 1 zeigt die am Los Alamos National Laboratory installierte und vom Compaq gelieferte ASCI Q, die in der Endausbaustufe 11968 Prozessoren mit 12 Terabytes Speicher umfassen soll.

Im Bereich der Programmierung von parallelen und verteilten Systemen besteht die Herausforderung zum einen darin, die durchzuführenden Berechnungen so auf die einzelnen Prozessoren zu verteilen, dass jeder Prozessor sinnvolle Berechnungen ausführen kann und dass alle Prozessoren zur gleichen Zeit die ihnen zugewiesenen Berechnungen abschließen. Zusätzlich muss dafür gesorgt werden, dass jeder Prozessor auf die Daten zugreifen kann, die er für die Durchführung der Berechnungen braucht. Dazu müssen eventuell

Daten zwischen den Prozessoren durch Verschicken von Nachrichten über ein Verbindungsnetzwerk ausgetauscht werden. Da ein solcher Nachrichtenaustausch zeitaufwendig ist, sollte die Anzahl der ausgetauschten Nachrichten und die ausgetauschte Datenmenge möglichst klein gehalten werden. Ein weiterer seit etwa 20 Jahren zu beobachtender Trend ist die Entwicklung schneller Netzwerke, über die die angeschlossenen Rechner Informationen austauschen können. Lokale Netzwerke (local-area networks, LAN) mit Übertragungsraten von 100 oder 1000 Millionen Bits pro Sekunde werden eingesetzt, um Rechner innerhalb eines Gebäudes zu verbinden. Neuerdings werden in diesem Bereich auch verstärkt Funknetzwerke eingesetzt (Wireless LAN) mit Übertragungsraten von bis zu 11 Millionen Bits pro Sekunde.



Abb. 1 (mitte): ASCI Q Maschine des Los Alamos National Laboratory

Globale Netzwerke (wide-area networks, WAN) erlauben die Vernetzung von Millionen von Rechnern weltweit, stellen aber typischerweise wesentlich geringere Übertragungsraten zur Verfügung. Die Verfügbarkeit der weltweiten Netzwerke ermöglicht die Entwicklung von verteilten Anwendungen, die es mehreren beteiligten Personen gestatten, von verschiedenen Orten aus gleichzeitig auf einen gemeinsamen Datenbestand zuzugreifen, wobei die verwendeten Protokolle sicherstellen, dass bei einer gleichzeitigen Veränderung der Daten durch mehrere Anfragen ein konsistenter Datenbestand entsteht. Beispiele für solche Anwendungen sind elektronische Reservierungssysteme wie sie z.B. von Fluggesellschaften, Hotels und Reiseveranstaltern eingesetzt werden oder Kontenverwaltungssysteme von Banken.

Während bei den genannten Anwendungen der schnelle koordinierte Zugriff auf gemeinsame Ressourcen im Vordergrund steht, wird mittlerweile auch versucht, die Rechenleistung von weltweit verteilten Rechnern gezielt für rechenzeitintensive Anwendungen zu nutzen (Grid Computing). Die Initiative beruht auf der Beobachtung, dass der Großteil der Rechenleistung von Prozessoren oft über mehrere Stunden ungenutzt bleibt. Die Idee besteht darin, durch Einsatz einer geeigneten Infrastruktur ungenutzte Rechner

zu einem großen virtuellen Rechner zusammenzuschließen, das Rechenleistung je nach Bedarf zur Verfügung stellen kann, ähnlich wie dies für Strom aus der Steckdose der Fall ist. Sobald ein zugreifbarer Rechner ungenutzt ist, kann er in das virtuelle Rechner-System eingebunden werden. Sobald die Rechenleistung wieder lokal benötigt wird, wird er wieder aus dem Rechner-System entfernt und steht dem lokalen Benutzer erneut uneingeschränkt zur Verfügung. Die Herausforderung besteht hier zum einen in der Entwicklung der Infrastruktur, so dass eine dynamische Verwaltung heterogener Rechner im Rahmen des Rechner-Systems möglich ist.

Anstrengungen zur Entwicklung einer solchen Infrastruktur wurden in den letzten Jahren von verschiedenen Forschergruppen unternommen, siehe z.B. das TeraGrid-Projekt ([www.teragrid.org](http://www.teragrid.org)), das Globus-Projekt ([www.globus.org](http://www.globus.org)) und das EuroGrid-Projekt ([www.eurogrid.org](http://www.eurogrid.org)). Zum anderen erfordert die Verwendung des Rechner-Systems eine dynamische Partitionierung der Anwendung mit einer effizienten Verteilung von Berechnungen und Daten auf die angeschlossenen Rechner.

Ein interessantes Projekt im Bereich des Grid Computing ist das SETI@Home-Projekt (search for extraterrestrial intelligence), das 1999 gestartet wurde, vgl. [setiathome.ssl.berkeley.edu](http://setiathome.ssl.berkeley.edu). Dabei sollen aus dem Weltraum eintreffende Radiosignale analysiert werden, um festzustellen, ob Signale mit nicht-natürlichem Ursprung entdeckt werden können, die auf außerirdisches Leben schließen lassen. Da von den Radioteleskopen große Datenmengen von Radiosignalen aufgefangen werden, ist die Untersuchung der

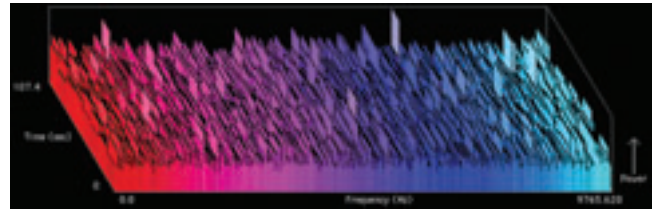


Abb.2 (oben):  
Graphische  
Darstellung der  
durchgeführten  
Frequenzanalyse  
des SETI-Projektes.

Signale eine sehr rechenzeitintensive Aufgabe. Die Idee des SETI@Home-Projektes besteht darin, die aufgefangenen Signale auf viele Rechner weltweit zu verteilen, um so eine möglichst genaue Analyse durchführen zu können. Die Verteilung erfolgt mit Hilfe eines Bildschirmschoners, der von der SETI-Webseite geladen werden kann und der die Kommunikation mit dem Projektserver realisiert. Der Bildschirmschoner besorgt einen Datenblock von Signalen vom Projektserver, führt die Analyse durch, sobald der Benutzerrechner ungenutzt ist und schickt das Ergebnis der Analyse wieder an den Projektserver zurück. Abbildung 2 zeigt einen typischen Datensatz des SETI@Home-Projektes.

Das SETI@Home-Projekt hat mittlerweile etwa 4 Millionen registrierte Benutzer weltweit, die seit dem Start des Projektes etwa eine Million Jahre CPU-Zeit zur Datenanalyse beigetragen haben. ■

## Kontakt:

Universität Bayreuth  
Lehrstuhl für Angewandte Informatik II  
(Parallele und Verteilte Systeme)  
Universitätsstraße 30  
95447 Bayreuth  
Tel.: 0921/55-7340  
Fax: 0921/55-7345  
Internet: <http://ai2.inf.uni-bayreuth.de>  
E-Mail: [rauber@uni-bayreuth.de](mailto:rauber@uni-bayreuth.de)



# Professur für Angewandte Informatik

# Diskrete Algorithmen

Angewandte Informatik wird bereits seit Mitte der 80'er Jahre für Mathematikstudenten als Nebenfach angeboten. Ein grundlegender Bereich ist dabei die Algorithmik, das heißt der Entwurf von schnellen Lösungsverfahren für unterschiedliche Probleme. Absolventen werden gesucht im Bereich der Industrie, der Softwarehäuser, der Banken und Versicherungen und der Beratungsfirmen.

Prof. Dr. Reinhard Laue

In gemeinsamen Projekten von Mathematik, Informatik und Industrie wurde von Diplomstudenten, Doktoranden und Projektmitarbeitern ein umfangreiches Produkt MOLGEN zur automatischen Strukturaufklärung in der chemischen Analyse erstellt. Dazu wurden schnelle Algorithmen entwickelt, um alle Moleküle auf dem Rechner zu simulieren, die den Messwerten aus verschiedenen Spektren entsprechen. Die Resultate sind vollständig und redundanzfrei. Das System erlaubt, am Bildschirm Vorwissen der Chemiker gezielt einzubringen, um die Vielfalt der theoretischen Möglichkeiten einzuschränken. Dazu wurde eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt, die Darstellungen der Moleküle 2- und 3-dimensional anbietet, siehe das Bildbeispiel.

Zuordnung von Spektren zu Teilstrukturen geschehen mit Algorithmen, die Methoden des Operation Research und künstliche neuronale Netze verbinden sowie alternativ mit statistischen Methoden.

Die Zuordnungsalgorithmen erwiesen ihre Stärke auch bei der Planung von Produktionsprozessen

in der Industrie. Weitere Entwicklungen konzentrieren sich darauf, komplexe Objekte in Datenbanken suchfähig zu machen. Im gemeinsamen Forschungsprojekt DISCRETA von Mathematik und Informatik werden auf der Versuchsplanung basierende Problemstellungen der Mathematik algorithmisch gelöst. ■

Prof. Dr.  
Reinhard Laue,  
Inhaber der  
Professur für  
Angewandte  
Informatik -  
Diskrete  
Algorithmen

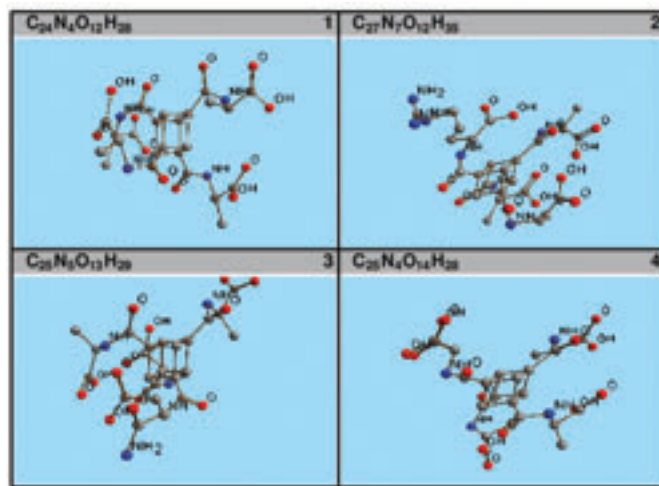


Abbildung: Automatisch generierte und platzierte Moleküle

## Kontakt

Universität Bayreuth  
Professur für Angewandte Informatik (Diskrete Algorithmen)  
Universitätsstraße 30  
95447 Bayreuth  
Tel.: 0921/55-3275  
Fax: 0921/55-3385  
Internet: <http://www.mathe2.uni-bayreuth.de>  
E-Mail: [laue@uni-bayreuth.de](mailto:laue@uni-bayreuth.de)



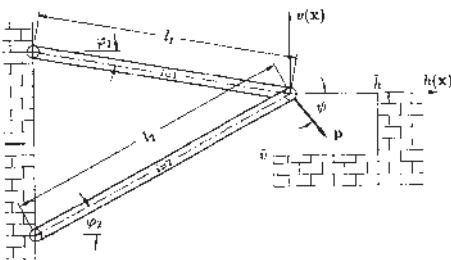
Prof. Dr. Klaus Schittkowski

# Professur für Angewandte Informatik Simulation und Optimierung komplexer Prozesse



Zur Entwicklung neuer Produkte oder zur Steuerung technischer Prozesse können mathematische Modelle sowohl während der Entwicklungs- als auch Produktionsphase einen wesentlichen Beitrag liefern. Sie erlauben die Beschreibung und Simulation komplexer Baugruppen oder Prozesse schon im Entwicklungsstadium, und können daher den Entwurf optimieren, Entwicklungszeiten reduzieren, die Qualitätskontrolle verbessern und die Produktionskosten reduzieren.

Zur Optimierung praktisch relevanter Entwicklungs- und Steuerungsaufgaben kommen Verfahren der nichtlinearen Optimierung zum Einsatz mit dem Ziel, eine vorgegebene Zielfunktion unter zusätzlichen Restriktionen zu minimieren. Eine typische Anwendung aus der mechanischen Strukturoptimierung könnte darin bestehen, das Gewicht eines Stabwerkes unter Einhaltung vorgegebener Festigkeitsbedingungen zu minimieren. Illustrativ beschreibt die beiliegende Skizze eine mechanische Struktur bestehend aus zwei Stäben unter einer vorgegebenen Belastung  $p$  und Schranken für den Entwurfsraum, in diesem Fall definiert durch maximal zulässige Verformungen.



Hierzu ist die Entwicklung leistungsfähiger numerischer Verfahren und die Implementierung effizienter, robuster Software erforderlich, die am Institut entwickelt und in nahezu allen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Gebieten

international zum Einsatz kommt sowohl in der Industrie als auch im akademischen Umfeld. Aktuelle Forschungsvorhaben und Kooperationsprojekte in diesem Kontext sind

- Entwicklung von Optimierungstools zur Konstruktion von Massivbauteilen (CadFem),
- optimaler Entwurf von elektronischen Bauteilen (Epcos),
- Entwurf von Satellitenantennen (Astrium),
- Modellierung und optimale Steuerung von Fließwegen in offenen Kanälen (DFG),
- Rezeptor-Ligand-Bindungsstudien für pharmazeutische Substanzentwicklungen (Boehringer Ingelheim Pharma),
- optimale Steuerung chemischer Reaktoren (BASF).

Hierbei spielt auch die Parameterschätzung in dynamischen Systemen eine wichtige Rolle. Die Grundidee ist, einen zeitabhängigen realen Vorgang durch ein mathematisches Modell zu beschreiben und Parameter, die sich nicht direkt messen lassen, durch einen Vergleich von anderen gemessenen Daten und dem theoretisch vorhergesagten Modell-

verhalten zu identifizieren. Dazu kann die Summe der Quadrate der einzelnen Abweichungen minimiert werden. Mit Hilfe dieses Vorgehens können mathematische Modelle verifiziert und quantitativ analysiert werden.

Zum Einsatz kommen die unterschiedlichsten Techniken. Aus Effizienzgründen werden alle numerischen Basisalgorithmen in Fortran entwickelt, während auf der anderen Seite flexible und anwenderfreundliche GUI's basierend auf Modelldatenbanken entwickelt werden. ■

## Kontakt

Prof. Dr. K. Schittkowski  
Universität Bayreuth  
Fakultät für Mathematik und Physik  
95440 Bayreuth  
Tel.: 0921 553278  
Fax: 0921 552999  
E-Mail: klaus.schittkowski@uni-bayreuth.de  
Internet: <http://www.klaus-schittkowski.de>



Prof. Dr. Klaus Schittkowski,  
Inhaber der  
Professur für  
Angewandte  
Informatik -  
Simulation und  
Optimierung komplexer Prozesse

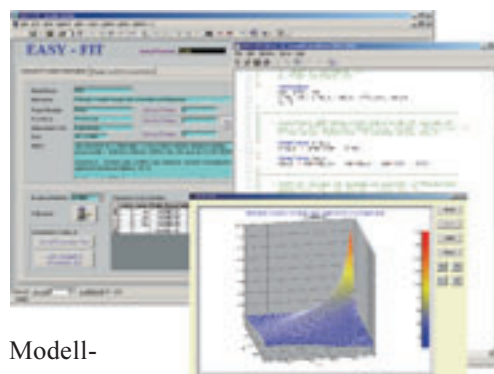


Abb.1 (links oben):  
Codierung eines  
numerischen  
Algorithmus

Abb.2 (links unten):  
Optimierung einer  
mechanischen  
Struktur

Abb.3 (rechts unten):  
Modelldatenbank  
zur Parameter-  
schätzung in dynamischen Systemen

# Gedanken einer Fachschaft

Mit knapp 8.000 Studierenden ist Bayreuth eine der kleineren Universitäten, aber gerade das empfinden wir oft als einen Vorteil: Alle, die sich für einen Studienplatz in der Fakultät I - Mathematik/Physik/Informatik - entschieden haben, finden hier wohl eine einzigartige Studenumgebung vor. Die überschaubare Zahl von Studierenden in den einzelnen Studienrichtungen ermöglichen uns, die ersten Schritte ins neue Unileben in einer fast familiären Atmosphäre zu unternehmen und auf dem überschaubaren Campus (auf dem man sich auch ohne Stadtplan sehr gut zurecht findet) fühlt man sich schnell zuhause.

Dennoch merkt man deutlich, dass es an der Universität Bayreuth auch Fächer mit großen Studierendenzahlen gibt, die insbesondere zu Zeiten von Klausuren dann in alle verfügbaren Arbeitsplätze auch in "unserer" Bibliothek im Gebäude NW II drängen und so der Platzmangel dort auch für uns zeitweilig ein ernst zu nehmendes Problem darstellt. Leider haben wir - die Studierenden und Fachschaftsmitglieder - hier noch keine befriedigende Lösung finden können. Betrachtet man das Angebot an Vorlesungen, Übungen, Seminaren für Studierende der Fakultät I so

lässt sich feststellen, dass der Lehrplan gut strukturiert und durchdacht ist. Es existiert ein ausgewogenes Maß an einerseits fachlich spezialisierten und andererseits grundlagenfördernden Programmen. Dazu zählen u. a. auch die studienbegleitenden Praktika für Physikstudenten und die fächerübergreifende Zusammenarbeit zwischen den Fakultäten. Auch das Angebot von Büchern und Zeitschriften in der Bibliothek soll hier positiv erwähnt werden (wenn nur das Arbeitsplatzproblem nicht wäre). Besonders sei auch der gute Kontakt zu den Professoren und Mitarbeitern hervorgehoben. Egal ob während oder nach einer Vorlesung, auf dem Gang oder in einer Fragestunde, sie sind immer bereit Fragen zu beantworten und Hilfestellungen zu geben.

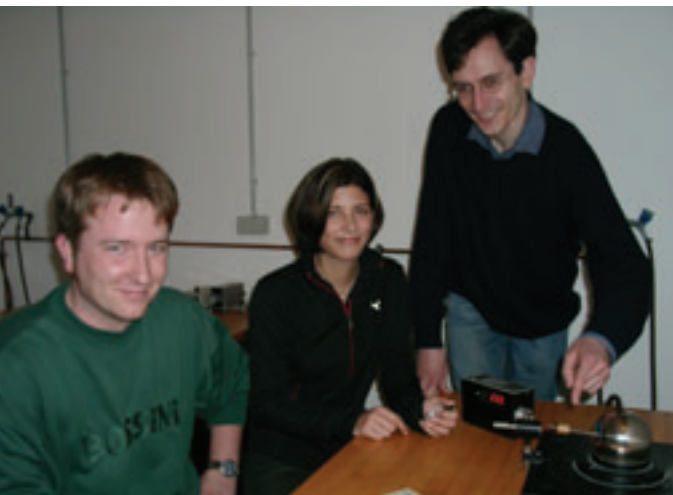
Aber natürlich tauchen zwischendurch auch größere Probleme oder Fragen auf zur Uni, zum Studium, zu studentischen Aktivitäten oder anderen Themen. In diesem Falle kommt man am besten zu uns, der Fachschaft. Zu unseren Aufgaben gehört es, Erleichterung im alltäglichen Studienleben zu verschaffen. So kann man bei uns frühere Klausuren, Skripten und Prüfungsprotokolle zur Vorbereitung zu den einzelnen Prüfungen finden und sich über andere Programme informieren. Darunter fallen z. B. eine spezielle Betreuung der Erstsemester, diverse Parties mit einer "berühmten" Physikerbar und verschiedene Filmvorführungen. Doch wie immer, wenn diese Angebote große Resonanz finden, so treten gerade hier Beschränkungen unserer Möglichkeiten auf, denn unser 15 qm großes Fachschaftszimmer ist der starken



Nachfrage kaum gewachsen. So gestaltet es sich zunehmend schwierig, in diesem Raum einerseits ratsuchende Studenten zu betreuen und andererseits unsere organisatorischen Arbeiten durchzuführen. Aber wir sind nicht ohne Hoffnung, dass trotz der wachsenden Zahlen von Studierenden in unserer und den Nachbarfakultäten hier evtl. auch eine alternative Lösung gefunden werden kann. Studieren in Bayreuth bedeutet, dass man nicht schon in den ersten Semestern den Spaß an der gewählten Fachrichtung verliert, sondern dass man lernt, für seine Begeisterung eine breite Grundlage an Wissen zu erarbeiten, zusammen mit den Kommilitonen und dem Lehrpersonal. In diesem Sinne sieht sich die Fachschaft als ein wichtiger Teil der Fakultät, um einerseits Verbesserungen vorzuschlagen - denn nichts ist so gut, dass es nicht verbessert werden könnte - und andererseits zusammen mit den Instituten Probleme zu erkennen und zu beseitigen. ■

Tobias Hertkorn  
Laura Winterling  
Tobias Pflock

Fachschaft Mathe/Physik/Informatik 2002/03



# Afrikaforschung exzellent beurteilt

Ein überaus positives Urteil über die Bayreuther Afrikaforschung hat jetzt eine vom "Rat für Wissenschaft und Forschung" beim Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst eingesetzte Evaluierungskommission abgegeben. Sowohl strukturell und quantitativ als auch qualitativ-inhaltlich sei in den vergangenen 27 Jahren ein in Deutschland einmalig differenziertes Profil auf dem Gebiet der Afrikastudien entwickelt worden, lobt der Bericht die Bayreuther Aktivitäten.

Die Lehrveranstaltungen in Afrikanistik, also die Beschäftigung mit afrikanischen Sprachen, zeichneten sich durch "angemessene Breite und Vielfalt" aus, und "höchst beeindruckend" stelle sich die Drittmittelinwerbung in Zusammenhang der verschiedenen afrikanologischen Forschungsaktivitäten dar. Zudem wird von den Prüfern die Dichte und Vielfalt der internationalen Kontakte gelobt. Alle Ansätze und Bestrebungen zum Ausbau und zur Vertiefung des Bestehenden sollen nach Auffassung der Evaluierer "volle Unterstützung finden". Sie schlagen deshalb vor, das neue Bachelor-/Master-Ausbildungsprogramm zu fördern, dabei aber nicht die klassischen Magister-Studiengänge Afrikanistik und Ethnologie in den Hintergrund treten zu lassen.

Weiter wird eine "intensivere Zusammenarbeit" etwa durch Gastprofessuren zwischen dem Münchner "Institut für Ethnologie und Afrikanistik" und der Bayreuther Forschungslandschaft als richtiger Weg empfohlen. Mittel für Exkursionen nach Afrika und Einladungen aus Afrika sollten merklich erhöht werden, zumal die finanzielle Situation der meisten afrikanischen Universitäten dramatisch sei, wird angemerkt.

Bei der Ethnologie, die von der Evaluationskommission in Zusammenhang mit der Afrikanologie als Kulturraumforschung verschiedener Disziplinen gesehen wird, sieht die Kommission die Universität Bay-

reuth mit ihrem afrikanologischen Profil durch die Vielfalt ihrer Forschungsleistungen und ihrer internationalen Kontakte auf einem Spitzenplatz in Bayern.

Die auf Afrika bezogene Kulturraumstudien seien in Lehre und Forschung vorbildlich organisiert und wiesen eine beeindruckende Fachprofil und zugleich ein hohes Maß an Interdisziplinarität auf. Das Institut für Afrikastudien (IAS), in dem Ethnologie und Afrikanologie inkl. Afrikanistik und afrikanische Literaturen mit anderen Disziplinen wie Soziologie, Geographie, Geschichte, Islamwissenschaft, Religionswissenschaft, Romanistik, Anglistik, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften sowie Biologie organisatorisch verknüpft sind, habe sich in einem weit über Bayern und Deutschland hinausreichenden Ruf als Afrika-orientiertes Zentrum erworben, stellt die Kommission fest. In ihrer Intensität und Dauer seien die Forschungsleistungen des Instituts für Afrikastudien als einmalig in Deutschland zu bezeichnen. Als dringlich wird empfohlen, den Umfang der Neuanschaffungen im Bibliotheksbereich zu stabilisieren, "um den einzigartigen Forschungsstandort Bayreuth nicht einzuschränken".

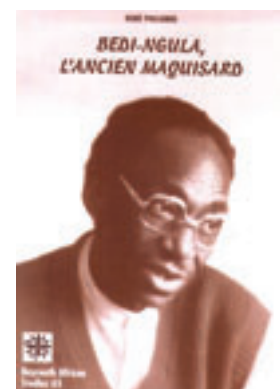
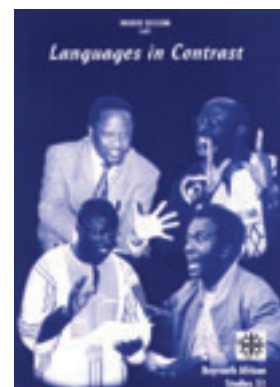
Die Afrikaforschung der Universität Bayreuth wurde und wird in erheblichen Umfang von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt, z. B. durch Finanzierung des Sonderforschungsbereichs 214 "Identität in Afrika" (1984 - 1997), des Graduiertenkollegs "Interkulturelle Beziehungen in Afrika" (1991 - 1999) und seit 2000 des Sonderforschungsbereichs / Forschungskollegs 560 "Lokales Handeln in Afrika im

Kontext globaler Einflüsse". Der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) unterstützt afrikanische Promovierende an der Universität Bayreuth. Preisträger und Stipendiaten der Alexander-von-Humboldt-Stiftung sind Forschungspartner der Bayreuther Wissenschaftler.

Erwähnt wird in dem Bericht der Evaluierungskommission auch die Meinung der Studierenden, die die Betreuung durch den Lehrkörper als optimal einstufen. Ebenso spreche aus deren Sicht die dichte Vernetzung zwischen den verschiedenen Fächern und Fakultäten eindeutig für ein Studium in Bayreuth.

Zur Förderung der Absolventenzahlen wird empfohlen, in geeigneter Weise nachdrücklich für die Forschungs- und Lehrschwerpunkte Afrikawissenschaften in Bayreuth zu werben. Als richtiger Weg wird dazu das Angebot zusätzlicher Bachelor- und Master-Studiengänge neben dem klassischen Magister angesehen, wie er etwa mit dem sechsemestrigen, modular aufgebauten Bachelor-Studiengängen "Angewandte Afrikastudien, Kultur und Gesellschaft Afrikas" sowie "Geographische Entwicklungsforschung Afrikas" und seit dem vergangenen Jahr mit dem in englischer und französischer Sprache durchgeführten Master-Studiengang "Africa Development Studies in Geography" angeboten wird. Der Erfolg zeige sich in einer kurzfristigen Verdopplung der Neueinschreibungen und belege die Attraktivität angewandter Studiengänge, stellen die Evaluierer fest. ■

Jürgen Abel



Veröffentlichungen  
aus der Afrikaforschung an der  
Universität  
Bayreuth



# Nach PISA - brauchen wir eine "neue Lernkultur"?

**Fünfunddreißig Jahre nach der "Picht'schen Bildungskatastrophe" ein ähnliches Bild: Vorschnelele Schulzuweisungen und der Ruf nach "mehr" Lernen. Viele Rezepte, z.T. mit Blick auf die alte "Pauk- und Drillschule", überschätzen allerdings den Einfluss des Systems Schule im gesellschaftlichen Kontext, und sie übersehen die Komplexität von Schulleistungen. Eine Verbesserung der Lernbedingungen erfordert gesamtgesellschaftliche Anstrengungen und Strukturveränderungen im Bildungssystem. Der Beitrag von Schule und Unterricht liegt vor allem in der pädagogischen Umsetzung einer veränderten Lernkultur.**

Auch als man mit Pisa noch eine Stadt in Italien meinte, gab es schon sog. Bildungskatastrophen. Der letzte "Bildungsnotstand" erbrachte wegweisende Vorschläge, wie sie bereits 1970 vom Deutschen Bildungsrat im "Strukturplan für das Bildungswesen" als bildungspolitisches Programm formuliert wurden: Förderung frühen Lernens, Startchancengerechtigkeit, Lernen des Lernens, lebenslanges Lernen ... Differenzierung des Unterrichts, Vorverlegung des Einschulungsalters und Einführung einer entsprechenden Eingangsstufe, Ausbau zusätzlicher Förder- einrichtungen für Lernschwache usw. In der gegenwärtigen Bildungsernüchterung werden solche Forderungen fast formelhaft wiederholt - und man verstrickt sich in eine erneute Strukturdebatte.

Es zeigt sich, dass die Schule nicht allein auf Verbesserung äußerer Rahmenbedingungen setzen kann, sondern auch auf eine (innere) Reform angewiesen ist. Aus erziehungswissenschaftlicher Sicht sind Impulse hierfür genügend vorhanden. Beispielhaft vorgestellt wird eine Richtung, die meist unter dem (etwas unglücklich gewählten)

Begriff "Neue Lernkultur" zusammengefasst wird.

## Ansätze einer "neuen Lernkultur"

"Neue Lernkultur" (auch "Neues Lernen") versteht sich als pädagogisch-didaktisches Programm, das verschiedene traditionelle und innovative Argumentationsstränge zusammenzuführen versucht: (a) Neuinterpretation des reformpädagogischen Verständnisses "Vom Kinde aus" (b) Pädagogische Konsequenzen aus den Ergebnissen soziologischer Forschung zu "Veränderter Kindheit und Jugend" (c) Kognitionsorientierte empirische Lehr-Lern-Forschung (d) Systemtheoretisch und konstruktivistisch orientierte Erkenntnistheorie.

In entsprechender didaktischen Umsetzung wird den aktiv-konstruktiven Leistungen des Lernenden höchste Priorität beigemessen: Der Lernende soll stärker die aktive Rolle übernehmen, die Aufgabe des Lehrenden liegt mehr als bisher im Arrangement günstiger Lernsituationen und in der Lernberatung. Die zentrale Forderung an den Lehrenden lautet: Konzentriere dich stärker auf die Lernprozesse deiner Schüler als auf deren Lernergebnisse oder deinen geplanten Lehrgang! Als wichtige pädagogische Leitideen werden herausgestellt:

## Lernen baut stets auf vorher Gelerntes auf

Denken und Lernen sind "struktur-determiniert" angelegt, d.h. nicht direkt von außen bestimmt, sondern durch die bereits erworbenen kognitiven und emotionalen Strukturen. Man kann nur das lernen, was in diesen Rahmen passt und was den vorhandenen Denkmustern zugänglich ist (ansonsten verbleibt nur ein "kognitives Rauschen"). Es geht darum, "Anschlussfähigkeit" bzw. "Anschlusswissen" zu ermöglichen und Anregungen zu geben, vorhandene Wissensnetze selbstständig auszubauen. Die Einstiegsfrage in den Lernprozess lautet demnach "Was kannst / weißt du schon?" Im Mittelpunkt didaktischer Überlegungen stehen demnach die Lernvoraussetzungen und die Lernwege, die dort hin geführt haben. Dieses "Einklinken" in den tatsächlichen Lernprozess soll verhindern, dass "über die Köpfe der Schüler hinweg" unterrichtet wird (zumal PISA- und UNICEF-Studie nachweisen, dass besonders in Deutschland schwache Schüler "abgehängt" werden).

## Fehler geben Aufschluss über Lernweg und -voraussetzungen

Fehler sind normale Begleiterscheinungen des Lernens. Fehllei-



Professor Dr. Günther Schorch ist Inhaber des Lehrstuhls Grundschulpädagogik

stungen zeigen das erreichte Können und geben Hinweise, welche weiteren Lernangebote gemacht werden müssen, um zum nächsten Lernschritt zu ermutigen. Fehler stellen sozusagen "Fenster zum Lernen" dar und sind deshalb nicht von vornherein negativ zu bewerten. Um so notwendiger ist es allerdings, Lern- und Leistungssituationen deutlich voneinander zu trennen. Der Lernende muss wissen, wann es sich um eine Erfolgs- bzw. Leistungskontrolle handelt und hierfür auch die genauen Kriterien kennen, nach denen beurteilt wird. Leitidee ist eine "Leistungskultur", die nicht nur auf ("triviale") abfragbares Schulwissen, sondern vermehrt auf innovative und kreative Leistungen abzielt.

**"Modellierte Lernwelten" unterstützen nachhaltiges Lernen**

Bildung als Selbstbildung bedarf einer anregenden Lernumgebung, aus der individuell Impulse für den weiteren Lernweg entnommen werden können (vgl. Abb.2). Der Lehrende ist (mit strukturierter Darbietung, Instruktion, Belehrung, Organisation usw.) wichtiger, aber nicht einziger Faktor des pädagogischen Lernarrangements. Lern- und Arbeitsmaterialien spielen in einer "starken" Lernumgebung eine adäquate Rolle: Schulräume als pädagogisch gestaltete "Lernlandschaft", Arbeitsateliers, Lernwerkstatt, Stationenlernen,

Arbeit mit Computerprogrammen, ... aber auch "Lernen vor Ort", Begegnung mit Experten, das gemeinsame Erlebnis.

**Lernen als Arrangement sozialer und kommunikativer Zusammenhänge**

Befunde empirischer Lernforschung zeigen, dass Kinder und Jugendliche sehr viel und nachhaltig von Gleichaltrigen lernen, was auf geringeres "Bildungsgefälle" als zu Erwachsenen, und bessere "strukturelle Koppelung" der Vorstellungswelten zurückgeführt werden kann ("Gleiche Wellenlänge"). Demnach gilt es, möglichst häufig kommunikative und kooperative Lernsituationen herbeizuführen, die eigenständiges Befassen mit dem Lerngegenstand, gemeinsame Konstruktion von Wirklichkeit ermöglichen und damit eine Welterschließung anbahnen, die von individueller Sichtweise (ICH) über Auseinandersetzung mit anderen Vorstellungen (WIR) bis hin zu (allgemein vereinbarten, gesichertem und belastbarem) Wissen (ES) führt. Beachtet wird dabei, dass eine solche Kommunikation stets auf Inhalts- und Beziehungsebene stattfindet.

**"Lernen des Lernens" als Metakognition**

Im Zeitalter der Informations- und Kommunikationstechniken hat die Schule ihr Bildungsmonopol weit-

gehend verloren, zugleich eine neue Aufgabe erhalten: Hilfestellung beim Navigieren in der Informationsflut und Orientierung bei der Frage, was und wie gelernt werden soll - und zwar im Verständnis von "Allgemeinbildung" als Fähigkeit, aus vielen Einzelheiten das Allgemeine abheben zu können. Die empirische Unterrichtsforschung zeigt, dass guter Unterricht immer wieder Gelegenheit zur Metakognition gibt, d.h. Lernen und Üben selbst thematisiert und analysiert, entsprechende "Inseln der Reflexion" einbaut und die Schüler methodisch mitdenken lässt (Was wissen wir jetzt? Was wissen wir noch nicht? Was ist der nächste Lernschritt?). Ein solch proaktiver Unterricht berücksichtigt vorausgehendes und folgendes "Anschlusswissen" und fördert vorausschauendes Lernen.

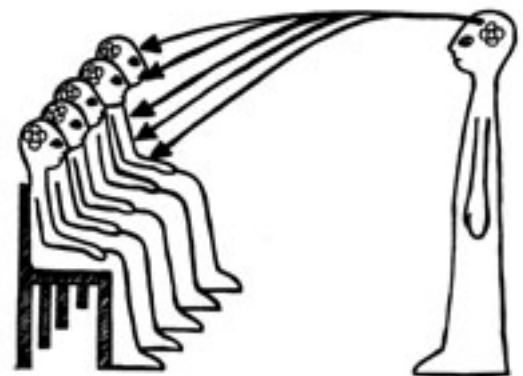
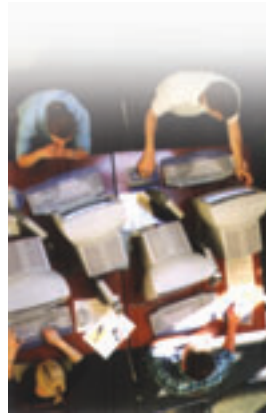


Abb. 1: "Abbild"-Didaktik "Transportier"-Methode

Zurück zur Ausgangsfrage: Wir brauchen dort eine "neue" Lernkultur, wo die gängige Lehrgangs- bzw. "Abbild"-Didaktik nach dem "Nürnberger-Trichter-Modell" (Abb.1) nicht mehr greift und durch eine "Didaktik der Lernwege" ersetzt werden muss, die am tatsächlich vorhandenen Lernstand ansetzt und Hilfen gibt, individuelle Leistungen zielorientiert auszubauen. Wenn nach den PISA-Ergebnissen eingefordert wird, mehr zu lernen, heißt das in erster Linie, mehr über das Lernen selbst zu lernen - und damit Lerneffektivität zu steigern. ■



Abb. 2: Konstruktionsmethode (aus: Klein, K. & Oettinger U.: Konstruktivismus. Hohengehren 2000)





# SINFONIEORCHESTER UNIVERSITÄT BAYREUTH

Elf Jahre Sinfonieorchester der Universität Bayreuth.  
Das heißt: über 50 Konzerte in der Stadt Bayreuth und im Umland, jedes Semester über 50 Mitwirkende, Zuschauer aus der gesamten Region, Klassik am See – ein Aushängeschild der Universität.

Unter der Leitung von Professor Helmut Bieler erarbeiten montags im Theaterraum Studierende und Nicht-Studierende sinfonische Werke verschiedener Epochen und Komponisten. Das neue Programm wird am Ende jedes Semesters in den bekannten Semesterabschlusskonzerten aufgeführt. Das Orchester hat sich als ein kulturelles Bindeglied zwischen der Stadt Bayreuth und ihrer Universität etabliert.

Eine bunte Mischung aus Studierenden aller Fakultäten und Nicht-Studierenden aus Bayreuth und der Region prägen das Orchester: gelebte Interdisziplinarität. Musikerinnen und Musiker sind **jederzeit willkommen und zum Mitspielen eingeladen.**

„Die Förderung der Kultur und die Finanzierung des Orchesters langfristig sicherzustellen“ sind zwei Ziele des 1998 gegründeten Vereins der Freunde und Förderer des Sinfonieorchesters.

**Helfen Sie, dem Orchester zu helfen – durch eine Spende oder Mitgliedschaft im Verein!**



[www.uni-bayreuth.de/sinfonieorchester](http://www.uni-bayreuth.de/sinfonieorchester)

**zuhören  
mitspielen  
fördern**