

spektrum

UMWELTFORSCHUNG



Bayceer

Editorial



Präsident der
Universität Bayreuth
Prof. Dr. Dr. h.c.
Helmut Ruppert

Liebe Leserinnen und Leser, Profilbildung und Schwerpunktsetzung sind die Schlagworte der derzeitigen fachlichen Konzentration an den bayerischen Universitäten. Damit möchte man eine Weiterentwicklung von Forschungskernen und auch gute Möglichkeiten der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses schaffen. Die Universität Bayreuth hat seit ihrem Beginn Mitte der 70er Jahre Profile und Schwerpunktsetzungen in der Forschung und darüber hinaus in der Lehre entwickelt. Sie hat bisher die Erwartungen an eine junge Forschungsuniversität erfüllt. Hohe Einwerbungen von Drittmitteln belegen ihre Wertschätzung in der Grundlagenforschung.

Mit dem BayCEER wird in mehreren Beiträgen ein Forschungsschwerpunkt der Universität Bayreuth dargestellt, der sich aus verschiedenen Ansätzen der ökologischen und umweltwissenschaftlichen Forschung ergeben hat. Über viele Jahre war auch das Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) der wichtige Kernbereich der ökologischen Systemforschung

an der Universität Bayreuth. Dieses Großprojekt, das mit hohen Mitteln vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt worden ist, wird Ende 2004 beendet sein. BayCEER, das schon im Jahre 2003 die Forschung im Bereich der Ökologie und der Umweltwissenschaften koordiniert hat, wird in einem noch breiteren Umfange die Nachfolge von BITÖK antreten. Die ökologische Forschung der Universität Bayreuth hat sich bundesweit, aber auch innerhalb Europas einen hervorragenden Platz gesichert. Sie ist ein Beispiel, wie man - ausgehend von Grundlagenforschungen - auch an zukunftsorientierten Problemlösungen zur Verbesserung der Lebens- und Umweltbedingungen beitragen kann und wie man den Transfer von Forschungsergebnissen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft einbringt.

Helmut Ruppert

Titelbild

Titelbild: Der Turm am Weidenbrunnen (Waldstein) im Fichtelgebirge ist eine der meteorologischen Messstationen des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung - BayCEER (Foto: P. Gerstberger)



Impressum

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>

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

Herausgeber:
Der Präsident der Universität Bayreuth

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

Auflage: 5000 / dreimal jährlich
Druck: Ellwanger Bayreuth
Telefon (09 21) 500-0

Inhalt

Umweltforschung an der UBT

Ökologie und Umweltforschung	4
Organismische Interaktionen	7
Von Läusen und Ameisen	8
Käfer können Leben retten	10
Termiten – Regenwürmer der tropischen Savannen	12
Artenvielfalt	
Biodiversität – nur was man kennt, kann man auch schützen!	14
Lehrstuhl Pflanzensystematik	16
DNA-Chips – moderne Diagnosewerkzeuge	18
Aktenzeichen Auerhuhn & Co. ungelöst	20
Ökosysteme	
Zeitreihenanalyse in der Hochwasserforschung	22
Fischer, Forscher, Landwirt (Weißenstädter Becken)	24
Neue Impulse für die Geomorphologie	27
Isotopen – Biogeochemie	
Stabile Isotope in der Umweltforschung	30
Unbestechliche Zeugen – Stabile Isotope in der Biochemie	30
Partnertausch im dunklen Wald	32
¹³ C und ¹⁸ O Isotopenflüsse über Ökosystemen	34
Umweltbelastung – Sanierung	
Blick unter den Boden	36
Perspektiven hydrologischer Forschung und Lehre	38



Uni Intern

Neuer superharter Halbleiter aus Verbundstoff hergestellt	41
BZKG – Bayreuther Zentrum für Kolloide und Grenzflächen	42
25 Jahre Emil-Warburg-Stiftung für die Physik an der UBT	44
Warum Emil-Warburg-Stiftung?	46
Das Geheimnis der Schachprogramme	48



Bayceer

Ökologie und Umweltforschung

Egbert Matzner, Thomas Gollan



Seit Gründung der Universität Bayreuth 1975 ist das Thema Ökologie und Umweltforschung einer ihrer Forschungsschwerpunkte. Die Bezeichnung ist geblieben, der Inhalt dieses Themas hat sich jedoch über die vergangenen drei Jahrzehnte stark gewandelt.

In den siebziger Jahren war Ökologie ein neuer Begriff im gesellschaftlichen Leben. Sie wurde gleichgesetzt mit Umwelt- und Naturschutz. In den Naturwissenschaften war die Ökologie schon immer in der Biologie zu Hause. Die Bayreuther Professoren Erwin Beck, Ernst-Detlef Schulze und Helmut Zwölfer gaben in dieser Zeit der Ökologie in Bayreuth eine neue, naturwissenschaftliche Ausrichtung. Im Jahr 1977 startete der Studiengang Geoökologie in Bayreuth. Sie wurde eine Umweltwissenschaft im wahrsten Sinne des Wortes. Prof. Reimer Herrmann († 2003) entwickelte die Vision einer geoökologischen Ausbildung, die Absolventen dazu befähigen sollte, auf der Basis einer breiten naturwissenschaftlichen Ausbildung Antworten

zu drängenden Umweltproblemen zu geben. Der Studiengang Geoökologie wurde zu einem Exportschlager und in Deutschland mehrfach kopiert.

Verbundprojekte innerhalb der Universität und mit Partnern außerhalb kennzeichneten von Anfang an die ökologische Forschung in Bayreuth (siehe Tabelle unten).

2003 formierte sich die ökologische Forschung neu zu einem profilbildenden Schwerpunkt an der Universität Bayreuth. Das Bayreuth Center of Ecology and Environmental Research – BayCEER wurde gegründet. Mitglieder sind über zwanzig Professoren aus dem Bereich der Biologie und Geowissenschaften. Forschungsschwerpunkte sind

- Funktion von Ökosystemen
 - Biodiversität
 - Umweltbelastung und -sanierung
- Seine Forschungsaktivitäten bindet BayCEER in die universitäre Lehre ein und initiiert und organisiert interdisziplinäre Lehrveranstaltungen zu aktuellen Fragen der Umweltwissenschaften.

Umweltminister Werner Schnappauf bekam bei der BayCEER-Eröffnung am 18. Juni 2004 eine große Gießkanne überreicht - um punktuell, und möglichst über der Bayreuther Uni, Fördermittel auszuschütten. Auf dem Bild: Walter Nadler (MdL), Ulrike Gote (MdL), Dr. Werner Schnappauf, Prof. Egbert Matzner (BayCEER), Hans Angerer (Regierungspräsident Oberfranken), Christoph Himmighofen (Präsident LfU Augsburg), Prof. Helmut Ruppert

Beispiele für Verbundprojekte in Ökologie und Umweltforschung an der UBT		spektrum
1978 – 1982	Bayern: Ökologie von Hecken	
1979 – 1992	DFG: SFB 137 „Gesetzmäßigkeiten und Steuerungsmechanismen des Stoffumsatzes in ökologischen Systemen“	
1983-1989	Bayerische Forschergruppe Forsttoxikologie	
1989 – 2004	BMBF: BITÖK - Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung	Ausgabe 1/2002
seit 2000	DFG-Graduiertenkolleg 678 „Ökologische Bedeutung von Wirk- und Signalstoffen bei Insekten“	Ausgabe 2/2001
seit 2000	DFG-Forschergruppe FOR 402 „Funktionalität in einem tropischen Bergregenwald Ecuadors“	Ausgabe 3/2003
seit 2000	Bayreuth Center of Ecology and Environmental Research – BayCEER	Ausgabe 3/2004

Zur Zeit gibt es zum Beispiel Überlegungen zu einem neuen Studiengang Ökotoxikologie. Gefragt ist Fachwissen über Strukturen in Ökosystemen, Transport- und Umsetzungsprozesse von Schad- und Fremdstoffen bis hin zu ihrer toxikologischen Bewertung.

BayCEER bietet mit seinen vielfältigen Arbeitsbereichen und langjährigen Erfahrungen in der Umweltforschung hervorragende

Voraussetzungen zur Entwicklung von Kriterien zur Umwelt- und Risikoabschätzung.

Umweltforschung kennt keine Grenzen – internationale Kooperationen sind der Standard. Dies war auch ein Grund für die englischsprachige Namenswahl des neuen Zentrums:

Bayreuth Center of Ecology and Environmental Research – BayCEER.



Ein Institut auf Zeit

Das **Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung BITÖK** wurde 1989 als „Institut auf Zeit“ gegründet. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, damals BMFT) richtete Ende der achtziger Jahre als Konsequenz der Waldschadensforschung an vier Universitäten Zentren für Ökosystemforschung ein: Kiel, Göttingen, München-Weihenstephan und Bayreuth. BITÖK war insofern eine Ausnahme, als seit 1990 neben der reinen Projektförderung die Einrichtung eines Universitätsinstituts mit neuen Professuren finanziert wurde.

Die Lehrstühle für Bodenökologie (Professor Egbert Matzner), Pflanzenökologie (Professor John D. Tenhunen), Ökologische Mikrobiologie (Professor Harold Drake) und Ökologische Modellbildung (Professor Michael Hauhs) ergänzten die vorhandene wissenschaftliche Kompetenz in der ökologischen Forschung. Nach der Gründung von BITÖK durch die Professoren Ernst-Detlef Schulze

(Pflanzenökologie), Reimer Herrmann (Hydrologie), Helmut Zwölfer (Tierökologie) und Ortwin Meyer (Mikrobiologie) übernahm seit 1993 Professor Egbert Matzner die Geschäftsführung.

Wissenschaftlich-technische Dienstleistungen für die Lehrstühle wurden durch zentrale Einrichtungen erbracht: die chemische Analytik, EDV und Datenbanken sowie den Betrieb von Versuchsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald. Im Wissenschaftlichen Sekretariat erfolgte das Projektmanagement, die Koordination der Projektbeantragung und Öffentlichkeitsarbeit des Instituts.

Nicht nur die Forschung und Lehre an der Universität Bayreuth profitierte von BITÖK: Fünf Stellen von BITÖK gingen in die Stärkung von Werkstätten, Bibliothek und Verwaltung der Universität.

Die Anschub-Finanzierung durch das BMBF und die Übernahme des Instituts durch den Freistaat Bayern wurde 1989 in einer Vereinbarung geregelt. Mit dem Ende des Engagements des BMBF zum

Bayceer

Dr. Gregor Aas	Pflanzenökologie
Prof. Erwin Beck	Pflanzenphysiologie
Prof. Carl Beierkuhnlein	Biogeographie
Prof. Klaus Bitzer	Hydrogeologie
Prof. Konrad Dettner	Tierökologie
Prof. Harold L. Drake	Mikrobiologie
Prof. Thomas Foken	Mikrometeorologie
Prof. Hartmut Frank	Umweltchemie
Prof. Gerhard Gebauer	Pflanzenökologie
Prof. Michael Hauhs	Modellbildung
Prof. Klaus H. Hoffmann	Tierökologie
Prof. Bernd Huwe	Bodenphysik
Dr. Manfred Kaib	Tierphysiologie
Prof. Sigrid Liede-Schumann	Pflanzensystematik
Prof. Egbert Matzner	Bodenökologie
Prof. Stefan Peiffer	Hydrologie
Prof. Gerhard Rambold	Pflanzenystematik
Prof. John D. Tenhunen	Pflanzenökologie
Prof. Dietrich von Holst	Tierphysiologie
Prof. Wolfgang Zech	Bodenkunde
Prof. Cornelius Zetzsch	Atmosphärische Chemie
Prof. Ludwig Zöller	Geomorphologie

Kontakt:

Dr. Thomas Gollan Geschäftsstelle
Tel. 0921 / 55 57 00
bayceer@uni-bayreuth.de

www.bayceer.uni-bayreuth.de

Dezember 2004 wird die seit 2000 begonnene schrittweise Übernahme Instituts durch den Freistaat Bayern abgeschlossen sein.

Die Grundfinanzierung durch das BMBF ermöglichte zahlreiche zusätzliche Projekte (überwiegend EU und DFG-Projekte). In den 15 Jahren seines Bestehens wurden von BITÖK insgesamt 45 Millionen Euro als Drittmittel eingeworben. Dies entspricht ca. 18 Prozent der gesamten eingeworbenen Drittmittel der Universität Bayreuth.

Über die Förderung von Einzelprojekten, meist Promotionen, waren die Mikrobiologie, Tierökologie, Pflanzenökologie, Hydrologie, Mikrometeorologie, Bodenkunde und Bodengeographie, Bodenphysik, Agrarökologie und Elektronenmikroskopie in das Institut eingebunden.

Ökologie und Umweltforschung

Autoren:

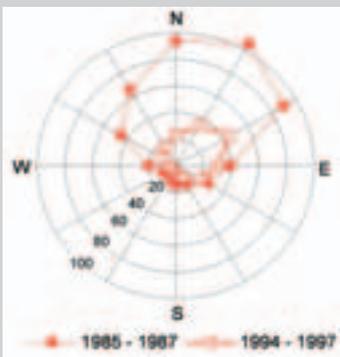
Prof. Dr. Egbert Matzner
 Lehrstuhl Bodenökologie
 Geschäftsführender Direktor BayCEER
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Matzner>

Dr. Thomas Gollan
 BayCEER Geschäftsstelle
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Gollan>

Mehr als 70 Promotionen, über 1000 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften und zahlreiche in Bayreuth veranstaltete nationale und internationale Tagungen und Workshops sind Zeichen der regen wissenschaftlichen Arbeit in BITÖK. Neun ehemalige MitarbeiterInnen von BITÖK wurden auf Professuren berufen. BITÖK wird – wie bereits 1989 ge-

plant – mit Ablauf der BMBF-Förderung Ende 2004 als zentrale Einrichtung der Universität Bayreuth geschlossen. Die erfolgreiche und international anerkannte Arbeit von BITÖK wird dann in das BayCEER überführt. Die erweiterten fachlichen Rahmenbedingungen bieten dort einen hervorragenden Rahmen für innovative Forschungsvorhaben in der Zukunft. ■

BITÖK: Am Waldstein im Fichtelgebirge liegt eine der Versuchsflächen von BITÖK zur Untersuchung von Waldökosystemen.



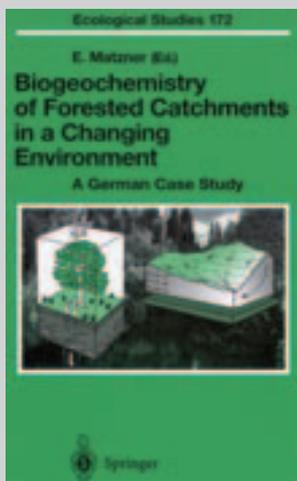
Die Konzentration von SO₂ in Abhängigkeit von der Windrichtung vor und nach der Wiedervereinigung. Im Zeitraum 1985-87 war die Schadstoffkonzentration bei Nord (DDR) und Ostwind (Tschechien) hoch, im Zeitraum 1994-97 sank die Konzentration insgesamt, die höchsten Konzentrationen wurden bei östlicher Windrichtung gemessen.



Messung des Wassertransports in Fichten während der Verdunstung



Der Turm für Messungen im und über dem Pflanzenbestand



Das Bayreuther Forum Ökologie dokumentierte mit über 100 Bänden wissenschaftliche Ergebnisse von BITÖK: Jahresberichte, Promotionen und Tagungs-Proceedings dokumentieren Informationen, die nicht in wissenschaftlichen Publikationen Platz finden. Band 100 war im Jahr 2003 die Zusammenfassung einer studentischen Arbeit zu allen wichtigen Klimatelementen im Raum Fichtelgebirge wie Temperatur und Niederschlag. Die Normalreihen für die Jahre 1961-1990 und 1971-2000 werden mitgeteilt, bewertet und die Klimatrends und Ihre Konsequenzen insbesondere für den Tourismus herausgearbeitet.



Das Bayreuther Forum Ökologie dokumentierte mit über 100 Bänden wissenschaftliche Ergebnisse von BITÖK: Jahresberichte, Promotionen und Tagungs-Proceedings dokumentieren Informationen, die nicht in wissenschaftlichen Publikationen Platz finden. Band 100 war im Jahr 2003 die Zusammenfassung einer studentischen Arbeit in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Umweltministerium:

Organismische Interaktionen

Ökosysteme und ihre Lebensgemeinschaften sind durch vielfältige Wechselbeziehungen zwischen den Organismen geprägt. Während in der Vergangenheit die Zusammensetzung von Ökosystemen sowie Stoff- und Energieflüsse durch Ökosysteme im Mittelpunkt des Interesses standen, beschäftigt sich die ökologische Forschung heute vermehrt mit funktionellen Aspekten der Beziehungen zwischen den Organismen und den Konsequenzen von Veränderungen bzw. Ausfällen dieser Funktionen. Organismische Interaktionen gehen mit einer gegenseitigen Beeinflussung und Veränderung der beteiligten Partner im Bezug auf ihre stofflichen, energetischen und informationellen Eigenschaften einher, und können indirekt oder direkt erfolgen. So kann ein Organismus durch sein Verhalten die Lebensbedingungen für sich und andere verändern, oder er kann Ressourcen schaffen oder solche verbrauchen, die von anderen hätten genutzt werden können. Hinzu kommen die direkten, intra- oder interspezifischen Wechselbeziehungen zwischen den Individuen.

Durch enorme methodische Fort-

schritte in der molekularbiologischen und chemischen Analytik haben sich in den letzten Jahren neue Wege zur Aufklärung der Mechanismen von Interaktionen zwischen Zellen, Organen und Organismen aufgetan – und sind auch zum Forschungsobjekt mehrerer Arbeitsgruppen der Biologie an der Universität Bayreuth geworden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf chemischen Substanzen, die eine kommunikative Funktion zwischen Organismen haben. Folgerichtig haben die Deutsche Forschungsgemeinschaft und das Land Bayern im Frühjahr 2001 der Einrichtung des Graduiertenkolleg 678 an der Universität Bayreuth zugestimmt, das sich mit der Aufklärung von Strukturen und Funktionen von Wirk- und Signalstoffen bei bzw. für Insekten beschäftigt und im April dieses Jahres um weitere drei Jahre verlängert wurde.

Signalgebung mittels chemischer Substanzen ist eine universelle Eigenschaft lebender Organismen. Chemische Wechselwirkungen bestimmen das Zusammenwirken von Zellen und Organen innerhalb eines Organismus genauso wie das Zusammenleben der Organismen in einem Lebensraum.

Während in den letzten Jahren Fortschritte in der Erforschung der Struktur komplexer Signalsysteme gemacht wurden (Chemische Ökologie, Molekulare Ökologie), und vielfach auch der Ablauf der Signalprozesse unter vereinfachten Bedingungen aufgeklärt werden konnte, fehlt häufig noch das Verständnis für ein koordiniertes Zusammenwirken der Signale auf verschiedenen Integrationsebenen, d. h. auf der ökosystemaren Ebene. Zu-

künftig wird somit eine integrative Forschung zur Aufklärung der biologischen Mechanismen mit breiter Gesamtschau im Vordergrund stehen.

Im Folgenden möchten wir einige Forschungsprojekte an den Lehrstühlen Tierökologie I, Tierökologie II und Tierphysiologie vorstellen, die sich mit chemischen und molekularen Mechanismen der innerartlichen und zwischenartlichen Wechselbeziehungen von Insekten, Pflanzen und Mikroorganismen beschäftigen. ■

AUTOREN:

Von Läusen und Ameisen

Prof. Dr. Klaus H. Hoffmann

PD Dr. Matthias W. Lorenz

PD Dr. Wolfgang Völkl

Lehrstuhl Tierökologie I

www.uni-bayreuth.de/departments/toek1/

Käfer können Leben retten

Prof. Dr. Konrad Dettner

Lehrstuhl Tierökologie II

www.bayceer.uni-bayreuth.de/Dettner

Termiten – Regenwürmer der tropischen Savannen

Dr. Manfred Kaib

Lehrstuhl Tierphysiologie

www.bayceer.uni-bayreuth.de/Kaib

Graduiertenkolleg 678

Das Graduiertenkolleg 678 der DFG hat die Aufklärung von Wirk- und Signalstoffen aus Insekten und Pflanzen und das Studium ihrer Wirkungsmechanismen als thematische Grundlage.

Projektleiter:

Prof. Klaus Hoffmann

Lehrstuhl Tierökologie I.

<http://www.uni-bayreuth.de/grako678/>

Von Läusen und Ameisen



Eine Arbeiterin der Schwarzen Wegameise (*Lasius niger*) sammelt Honigtau bei der Bunten Stängellaus (*Metopeurum fuscoviride*).

Blattläuse (Hemiptera: Homoptera, Aphidina) ernähren sich gewöhnlich vom Siebröhrensaft (Phloemsaft) der Pflanzen und sondern stark zuckerhaltige Exkrete ab, den Honigtau. Insbesondere für Ameisen hat der Honigtau vieler Blattlausarten eine große Bedeutung. Viele Ameisenarten decken den Kohlenhydratbedarf ihrer ganzen Kolonie ausschließlich durch dieses Exkret, das sie in der Regel direkt von der saugenden Blattlaus abnehmen. Für diese Ameisen ist es also wichtig, möglichst ergiebige Honigtauquellen zu erschließen und diese gegen Konkurrenten zu verteidigen. Von diesem mutualistischen Zusammenleben profitieren auch die Blattläuse. Der Ameisenbesuch schützt sie vor Räubern und Parasitoiden

und verhindert ihr Verkleben mit dem Honigtau.

Chemisch gesehen stellt Honigtau ein Gemisch aus unterschiedlichen Zuckern, Aminosäuren und weiteren Pflanzeninhaltsstoffen dar, wobei Zucker bis zu 98 % des Trockengewichtes ausmachen können. Während die Aminosäuren durchweg aus dem Phloemsaft stammen, unterscheidet sich die Zuckerszusammensetzung des Honigtaus deutlich von der des Siebröhrensaftes der besiedelten Pflanze. Der Phloemsaft der Pflanzen enthält fast ausschließlich das Disaccharid Saccharose (Sucrose). Blattläuse hingegen können verschiedene Zucker, die nicht im Phloemsaft enthalten sind, neu herstellen – wie z. B. das Trisaccharid Melezitose.

Im Rahmen einer Dissertation ist es gelungen, die Bunte Stängellaus, *Metopeurum fuscoviride*, auf einer künstlichen Phloemsaftquelle saugen zu lassen, die in ihrer Zusammensetzung beliebig manipuliert werden kann. Zur Überprüfung einer evtl. Beteiligung von endosymbiontischen Bakterien im Darm von *M. fuscoviride* an der Synthese der Melezitose wurde der künstlichen Diät das Antibiotikum Tetracyclin zugesetzt. Bei der Analyse der Honigtauproben mittels High Performance-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) zeigte sich kein Unterschied in der Zusammensetzung zwischen den Honigtauproben von Blattläusen mit und ohne Antibiotikabehandlung. *M. fuscoviride* synthetisiert Melezitose also

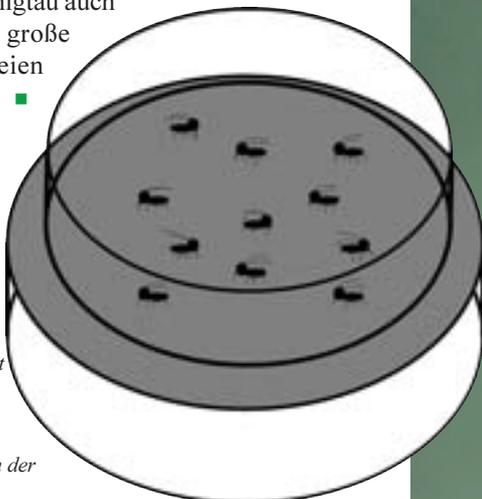
Ohne Unterstützung der Ameise kann sich M. fuscoviride ihres überschüssigen Honigtaus nicht entledigen.

ohne Beteiligung von Mikroorganismen.

Eine geeignete Pflanze zur Untersuchung mutualistischer Beziehungen zwischen Blattläusen und Ameisen ist der Rainfarn, *Tanacetum vulgare*. Hier leben acht verschiedene Blattlausarten an unterschiedlichen Pflanzenteilen, die von der Schwarzen Wegameise, *Lasius niger*, unterschiedlich intensiv besucht werden. Wie sich zeigen ließ, bevorzugt die Schwarze Wegameise Blattlausarten mit einer hohen Honigtauproduktion (z. B. *M. fuscoviride* mit 1000 µg Honigtau/Stunde) bei gleichzeitig hohem Gesamtzuckergehalt (80-100 mg/ml) und einem hohen Anteil an Melezitose im Honigtau (45-70 %), während Blattlausarten mit geringer Honigtauproduktion bei gleichzeitig niedrigem Melezitoseanteil überhaupt nicht besucht werden.

Dieses Muster hielten die Ameisen auch in sog. Wahlversuchen bei: Kolonien einer weniger bevorzugten Blattlausart wurden aufgegeben, sobald eine attraktivere Art zugegeben wurde. Die Signalfunktion der Melezitose scheint also darin zu bestehen, dass ein hoher Melezitosegehalt den Ameisen eine kohlenhydratreiche Nahrungsquelle anzeigt. In der Regel enthält zuckerreicher Honigtau auch noch relativ große Mengen an freien Aminosäuren. ■

Saugende Blattläuse auf künstlicher Diät. Der künstliche Phloemsaft befindet sich unterhalb einer gespannten Membran aus Parafilm®, der von der Blattlaus mit dem Saugrüssel durchstochen wird.



Käfer können Leben retten

Tiere können eine Vielzahl von Wirkstoffen liefern, welche gegen zahlreiche Krankheiten eingesetzt werden können. Wer kennt nicht den Arzneistoff Hirudin aus medizinischen Blutegeln, der schonend Thrombosen und Schlaganfällen vorbeugen soll oder hat nicht schon von therapeutisch interessanten Substanzen aus marinen Schwämmen, Korallen oder Manteltieren gehört? Auch die „Spanische Fliege“ (in Wirklichkeit handelt es sich um einen Ölkäfer) mit ihrem aphrodisierenden Giftstoff Cantharidin oder gegen Zahnschmerzen eingesetzte Alkaloide aus Marienkäfern müssen in diesem Zusammenhang genannt werden.

Biologen, Pharmazeuten und Chemiker bemühen sich darum, aus der extremen Vielfalt tierischer Organismen neue Wirkstoffe zu gewinnen, die als Antibiotika, Gerinnungshemmer oder Krebszellen zerstörende Substanzen zum Einsatz kommen. Am Lehrstuhl für Tierökologie II werden solche Phänomene von pharmazeutisch (wirkstofforientierten) oder chemisch-ökologisch arbeitenden Entomologen analysiert. Doch gibt es zahlreiche Hinweise, dass die wirklichen Produzenten dieser Wirkstoffe nicht die Tiere selbst, sondern die mit ihnen symbiontisch lebenden Bakterien oder Pilze sind. Folglich geht es insbesondere auch darum, solche wirkstoffproduzierenden Mikroorganismen zu isolieren und zu kultivieren, um daraus genügende Mengen der strukturell

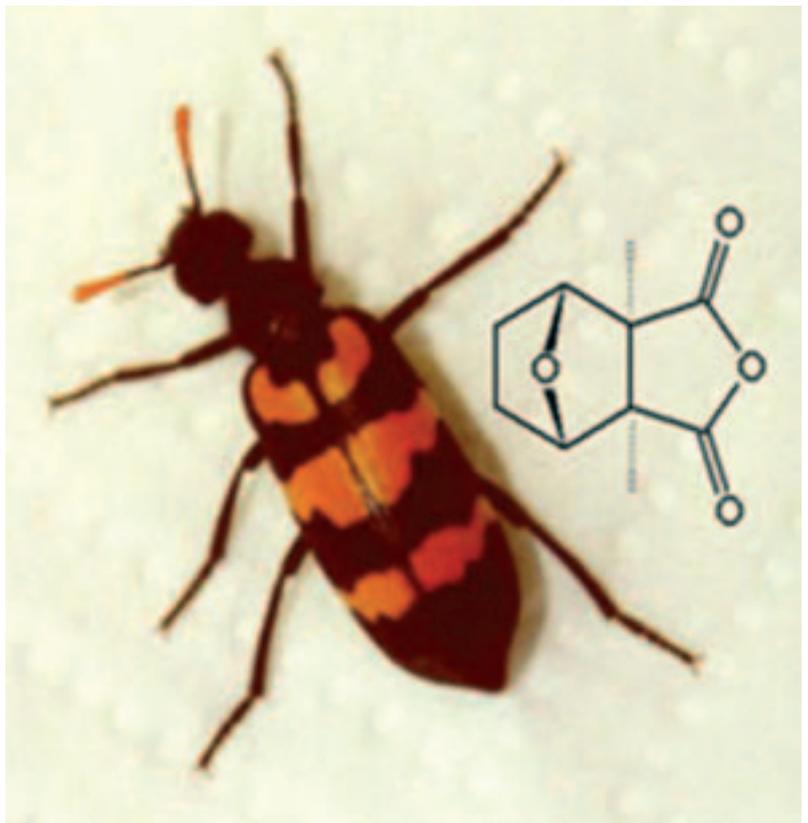
komplizierten Medikamente in die Hände zu bekommen.

Von großem Interesse ist gleichzeitig immer die Frage, welche Bedeutung diesen Stoffen im natürlichen Kontext, d. h. im Ökosystem, zukommen und inwieweit diese Verbindungen die Überlebensfähigkeit des Produzenten erhöhen.

Diese Fragestellungen sollen an Kurzflüglerkäfern der Gattung *Paederus* (Coleoptera, Staphylinidae) demonstriert werden. Im Blut dieser Käfer kommt das chemisch komplizierteste, bisher aus Käfern isolierte Gift Pederin vor. Es ruft beim Menschen Dermatitis oder eine Bindehautentzündung des

Auges hervor, sofern *Paederus*blut auf unsere Haut gelangt. Doch die Verbindung wirkt auch als Zellgift und ist durch eine starke Antitumorwirkung gekennzeichnet. Gleichzeitig können die weiblichen Käfer das nur während der Eireifung in ihnen gebildete Gift auch auf die Eier und damit ihre Nachkommenschaft, d. h. ihre Larven und Puppen übertragen.

Überhaupt werden bei der mehrere Monate dauernden Eiablage erhebliche Mengen des Giftes vom Weibchen in die gemeinsamen Nachkommen überführt. Die *Paederus*-Männchen enthalten nur geringste Mengen des Giftes, welches sie über ihre Mutter „be-



Der Ölkäfer *Hycleus spec.*, ein Verwandter der „Spanischen Fliege“ warnt durch seine Färbung mögliche Fressfeinde. Er produziert Cantharidin, eine potente chemische Waffe.

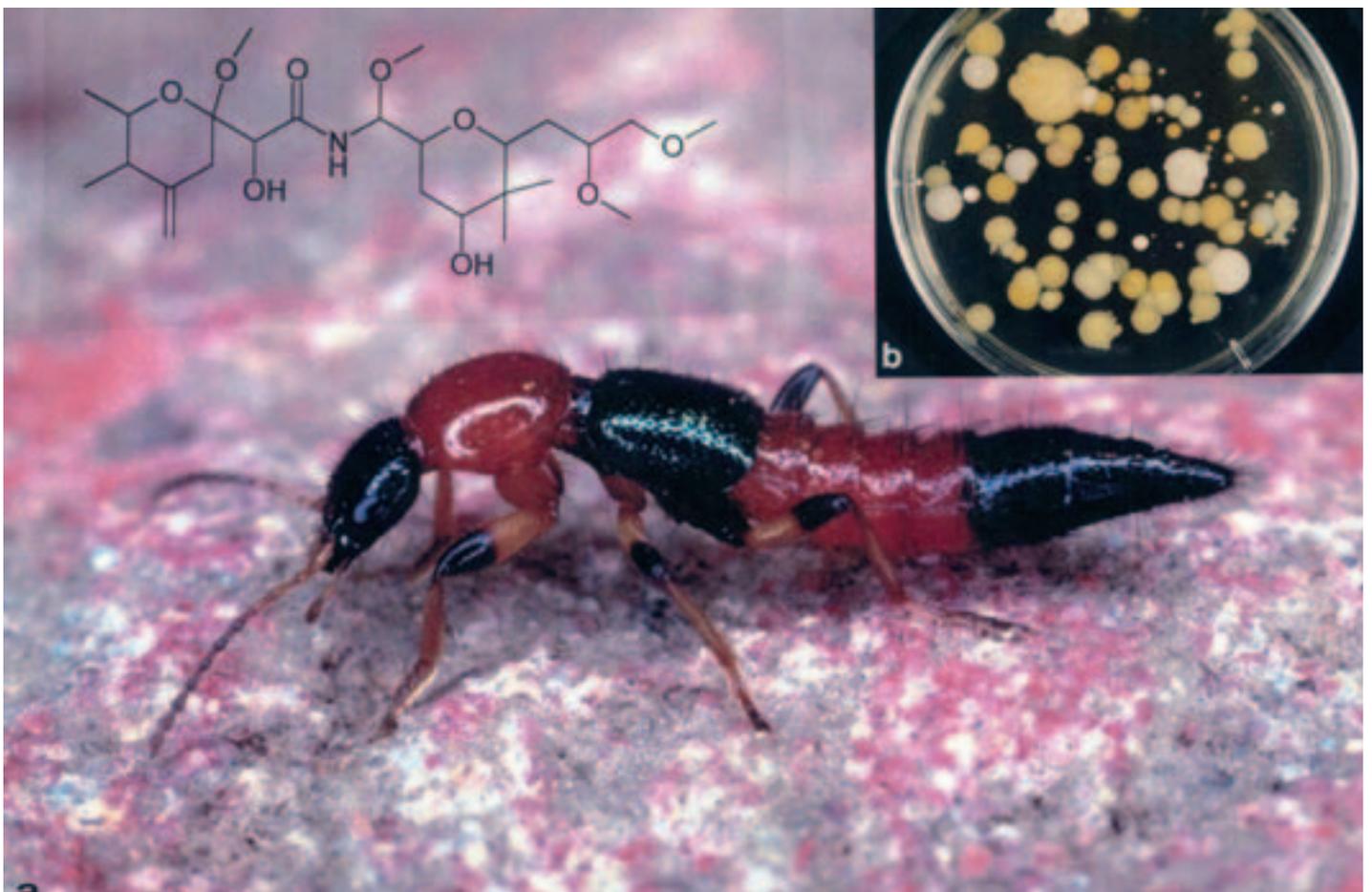
kommen“ haben. Die Käfer setzen ihre chemische Waffe allerdings nicht gegen Wirbeltiere, sondern speziell gegen ihre Hauptfressfeinde, die Spinnen ein. Schon geringste Mengen der Verbindung in Käfeiern, Larven, Puppen oder Imagines haben zur Folge, dass diese Entwicklungsstadien von Spinnen aller Art verschmählt werden.

Außerordentlich interessant ist die Tatsache, dass dem Pederin ähnelnde, chemisch ungewöhnliche Verbindungen auch in marinen Schwämmen vorkommen. Da Schwammkörper zu einem großen Teil aus Bakterien bestehen, lag die Vermutung nahe, diese Bakterien kämen als die wahren Wirkstofflieferanten in Frage. Wie hätte man sonst erklären können, dass fast identische Naturstoffe in Tieren vorkommen, die überhaupt nicht miteinander verwandt sind?

Diese Vermutung konnte tatsächlich bestätigt werden. Weibliche Käfer beherbergen nämlich ein symbiontisches Bakterium der Gattung *Pseudomonas*, welches für die Produktion des Pederins verantwortlich ist. Nahe verwandte Bakterien finden sich auch in jenen marinen Schwämmen, welche pederinähnliche Substanzen enthalten. Obwohl es sich bei den Bakterien um nahe Verwandte von *Pseudomonas aeruginosa* handelt, können sie bislang leider nicht kultiviert werden. Mittlerweile wurden am Max-Planck-Institut für Chemische Ökologie in Jena Teile des Genoms des nichtkultivierbaren Bakteriums isoliert, welche für die Bildung des Wirkstoffs kodieren. Es ist geplant, diese Pederingene in ein leichter kultivierbares Bakterium zu übertragen, damit der kompliziert gebaute Antitumor-Wirkstoff in theoretisch unbegrenzter Menge hergestellt werden kann.

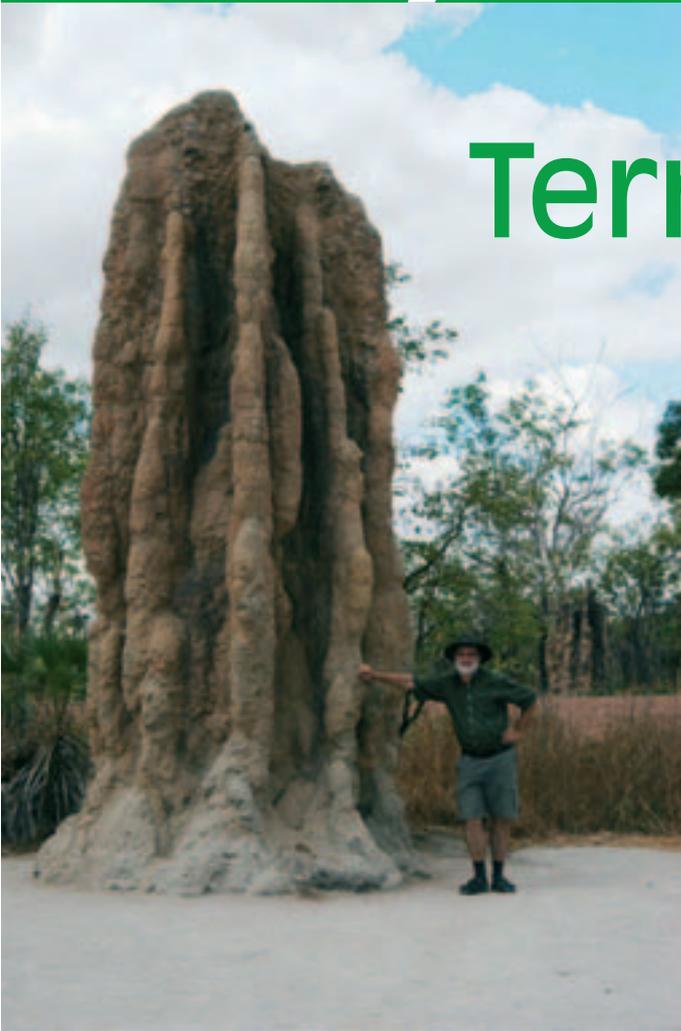
Dieses Beispiel illustriert gleichzeitig die enorme Bedeutung symbiontischer Wechselbeziehungen zwischen Bakterien/Pilzen und ihren Wirtsinsekten. In allen Fällen muss gleichzeitig gewährleistet sein, dass die symbiontischen Bakterien auf die Nachkommenschaft der Käfer übertragen werden. Offenbar sind *Paederus*-Weibchen in der Lage, die Oberfläche der abgelegten Eier mit diesen Bakterien zu beschmieren. Auf diese Weise wird der für das Insekt überlebensnotwendige Mikroorganismus von der frischgeschlüpften Larve oral aufgenommen. ■

Kurzflüglerkäfer der Gattung Paederus (a) und das in ihrer Hämolymphe (= „Blut“) befindliche Gift Pederin, welches auf die Haut gebracht, Blasen hervorruft und eine starke Antitumorwirkung aufweist. In der Abbildung (b) ist eine Agarplatte zu sehen, auf welcher aus dem Darm von Paederuskäfern isolierte gelbliche und weißliche Bakterienkolonien wachsen.



Manfred Kaib

Termiten – Regenwürmer



Theorien voraus. Wir konnten aber zeigen, dass auch Nicht-Vollgeschwister kooperieren, nämlich dann, wenn die Umweltbedingungen schlechter werden, d.h. durch Verknappung von Ressourcen wie Lebensraum und Nahrung. Dann dominiert der Nutzen der Kolonie über dem Interesse des Individuums.

In den Medien werden Termiten häufig als schlimme Schädlinge dargestellt, die Holz fressen und mancherorts Holzhäuser zum Einsturz bringen. Übersehen wird jedoch meist, dass weit mehr als 90% der Termitenarten keine solchen Schäden anrichten, sondern im Gegenteil überaus nützliche Glieder in den Nahrungs- und Stoffflussketten der Tropen darstellen. In den Savannen Ostafrikas z. B., die allgemein durch ihren großen Wildreichtum bekannt sind, stellt allein eine Gruppe von grasfressenden Termiten mehr Biomasse, als alle Säugetiere inkl. der Rinderherden der nomadischen Volksstämme zusammen. Diese Termiten wälzen die Böden um, lockern sie auf und tragen, da sie das Gras verwerten, das die Wiederkäuer nicht mehr nutzen können, wesentlich zur Humusbildung bei, ähnlich wie in unseren Breiten die Regenwürmer. Wie alle sozialen Insekten verfügen auch Termiten über ein Signalsystem, anhand dessen sie zwischen Nestgenossen kommunizieren. Sie können auch Fremde erkennen, denn innerhalb einer Kolonie haben alle Individuen das selbe Er-

kennungssignal. Termiten besitzen keine Augen; sie nutzen eine chemische Sprache. Die Signale zur Nestgenosserkennung stellen Wachse dar, die die Termiten auf ihrer Körperoberfläche tragen und die sich aus komplexen Mischungen aus Kohlenwasserstoffen zusammensetzen. Anhand dieser chemischen Signale entscheiden Termiten darüber, ob sie mit Artgenossen, die sie bei der Nahrungssuche treffen, kooperieren oder ob sie diese bekämpfen und damit ihr eigenes Territorium verteidigen.

Unsere Untersuchungen zur chemischen Kommunikation der Termiten zeigen, dass das Aggressionsverhalten zwischen Nestfremden um so ausgeprägter wird, je mehr sich die Erkennungssignale unterscheiden. Diese Signale werden nicht von der Umwelt geprägt, sondern sind weitgehend genetisch festgelegt; je weniger Individuen verwandt sind, um so mehr bekämpfen sie sich.

Jedoch entdeckten wir bei einer Termitenart in den Küstenwäldern Kenias auch Überraschendes. Bei dieser Art gibt es erwartungsgemäß zwischen benachbarten Kolonien große Unterschiede bei den chemischen Erkennungssignalen. Allerdings lässt sich das Ausmaß der Aggression nicht alleine durch Signalunterschiede erklären. Es zeigte sich nämlich, dass sich Individuen aus benachbarten Kolonien zwar als nestfremde Artgenossen erkennen, jedoch auch dann vertragen, wenn die Chemie nicht passt. Macht das

*Zur Errichtung dieses Baus der Termiten *Nasutitermes triodius* im Norden Australiens haben die nur 5/1000 Gramm schweren Termiten alleine überirdisch rund 50 Tonnen Erde verbaut, also 10 Milliarden mal mehr, als ein einzelner Termitenarbeiter wiegt.*

Viele Termitenarten (Isoptera) errichten aus Lehm eindrucksvolle Bauten, die sehr vielgestaltig sein können und teilweise, wie z. B. in den afrikanischen Savannen oder im Norden Australiens, sogar die Landschaft prägen. Zu solchen gigantischen Bauleistungen sind Termiten fähig, da sie sozial organisiert sind in Staaten, die mehrere Millionen Individuen umfassen können. Bewohner einer solchen Kolonie sind Vollgeschwister, da sie meist alle von einem König und einer Königin abstammen. Als soziale Insekten leben diese Individuen friedlich in ihrer Kolonie zusammen und führen ihre Aufgaben koordiniert und gemeinsam aus.

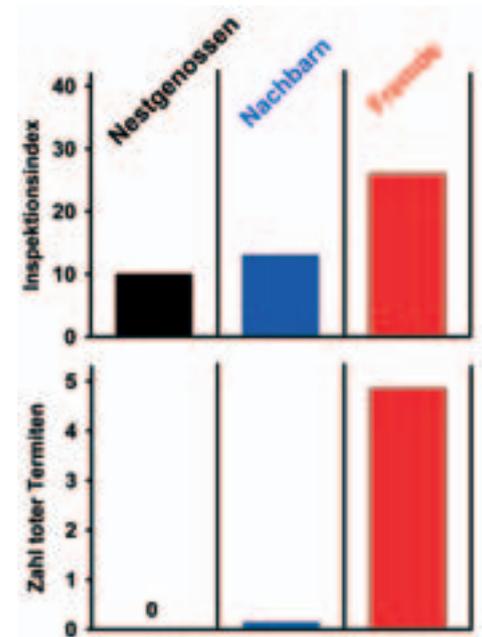
Diese Koexistenz ist aber nicht selbstverständlich. Bei einigen Termitenarten, in denen mehrere Königinnen reproduzieren, sind die Arbeiter nicht Vollgeschwister, und somit sollten in einer Kolonie Konflikte entstehen. Das sagen zumindest die soziobiologischen

der tropischen Savannen

Sinn? Durchaus, denn sobald einmal die territorialen Verhältnisse zwischen Nachbarn geklärt sind und akzeptiert werden, wäre ein ständiges Kämpfen zwischen Nachbarn unnötiger Energieaufwand und würde auch Verlust von Individuen bedeuten.

Es reicht diesen kleinen Tieren offensichtlich aus zu erkennen, dass es sich bei einem Kontakt mit einem anderen Artgenossen zwar nicht um

einen Nestgenossen, jedoch um einen friedlichen Nachbarn handelt. Ist der andere hingegen ein Fremder, wird er bekämpft, denn es könnte ein Eindringling sein, der das etablierte Territorium streitig machen möchte. Die Termiten führen offensichtlich eine Kosten-Nutzen-Kalkulation durch und kämpfen erst dann, wenn die Existenz des Staates bedroht ist. ■



Nicht alleine die Chemie bestimmt, wer sich verträgt und wer nicht. Termiten (*Macrotermes falciger*) unterscheiden zwischen Nestgenossen, Nachbarn und Fremden (oben). Doch nur die fremden Arbeiter werden bekämpft (unten). Treffen je 5 Arbeiter aus zwei fremden Kolonien zusammen, so sind bereits nach 5 min Kampf durchschnittlich die Hälfte der Tier tot.

Diese drei Königinnen koexistieren in einer Kolonie der Termiten *Macrotermes michaelseni*, obwohl sie nicht verwandt sind. Jede der drei Königinnen vermag täglich über 10.000 Eier zu legen.



Biodiversität –

nur was man kennt, kann man auch schützen!

Wenn wir heute in heimischen Regionen spazieren gehen, dann kennen wir jeden Baum, jeden Strauch und jedes Kraut mit wissenschaftlichem Namen. Vielen mag es dabei selbstverständlich erscheinen, dass Organismen bekannt zu sein haben und dass sie einen ge-

setzesgleich feststehenden Namen besitzen, der mit einem schön illustrierten Bildband in der Hand auch jedem zugänglich ist. Doch der Weg dahin war oder ist oft sehr lang und mühsam, bedarf der sorgfältigen Erforschung des gesamten Organismus, der benannt und stammesgeschichtlich eingeordnet werden soll.

Seit Aristoteles (384-322 v. Chr.) befasst sich der denkende Mensch mit der Ordnung der Natur und der Klassifizierung der Organismen und ihrer Vielfalt, heute gern als „Biodiversität“ bezeichnet. Doch erst Carl v. Linné sorgte im 18. Jahrhundert für die Grundlagen der biologische Systematik. Er versuchte, die Vielfalt der Pflanzen in einem natürlichen System zu klassifizieren und Arten mit Hilfe eines Doppelnamens (binäre Nomenklatur) eindeutig zu benennen. Als eine basale Maßeinheit der Biodiversität wird heute zumeist die Spezies, die Art genommen. Dies wird bei weitem nicht allen Fragestellungen gerecht, doch ist die Art noch immer die objektivste Einheit, um Vielfalt zu messen und um damit auch die vermeintlich genetische Vielfalt, die dahintersteckt, zu erfassen.

Als Art wird, zumindest in der Botanik, eine Gruppe von Lebewesen bezeichnet, die sich in der Summe ihrer wesentlichen Merkmale sehr ähnlich ist und die so beschreibbar ist, dass Angehörige einer Art jederzeit erkennbar sind. Darüber hinaus sollen ihre Indi-

viduen in einem gemeinsamen Verbreitungsgebiet leben und sich fruchtbar miteinander fortpflanzen und dabei reproduktiv von den Individuen anderer Arten isoliert sein. Ob eine Art 'wirklich' existiert oder nur aufgrund des gewählten Klassifizierungsschemas besteht, darüber wird philosophisch seit langem diskutiert (z.B. in den Werken des größten lebenden deutschen Biologen, Ernst Mayr, der in diesem Jahr seinen 100sten Geburtstag feiert).

Biodiversität beschreibt jedoch die Vielfalt des Lebens auf allen Organisationsebenen. Es geht also nicht um die reine Artenvielfalt, sondern vielmehr um strukturierte Komplexität. Daraus zu schließen, Biodiversitätsforschung ließe sich betreiben ohne Erforschung der Artenvielfalt, wäre aber falsch. Zuweilen mündet die durchaus richtige Aussage „Biodiversität ist mehr als Artenvielfalt“ in Reaktionen, systematisch-taxonomische Forschung für entbehrlich zu halten. Arten bzw. Artnamen (Taxa) sind jedoch weiterhin die Basis jeder Aussage zur Biodiversität. Wenn diese basalen Fakten nicht stimmen, sind alle daraus abgeleiteten „höheren“ Gedankengebäude höchst zweifelhafter Natur.

Doch welches Ziel hat und welchen Nutzen hat die Biodiversitätsforschung denn tatsächlich? Vorrangig müssen Erhalt von Ökosystemen, ihre nachhaltige Nutzung und verlässliche Voraussagen ihrer

„Erforschung und Erhaltung von Biodiversität funktioniert nur auf der Basis von Erfassung, Beschreibung und Benennung von Organismen“

Die Analyse aller Daten, die über einen Organismus zur Verfügung stehen, bildet die Grundlage einer optimalen Rekonstruktion der Stammesgeschichte. Während dem Evolutionsforscher die Stammesgeschichte alles ist, nutzen dem Feldbiologen Aussagen zur Abstammung der betrachteten Arten wenig, er braucht Fakten, mit denen er arbeiten kann. Nur gemeinsam sind moderne und klassische Methoden wirklich stark! Dabei zeigt die funktionelle Unverzichtbarkeit der Systematik und Taxonomie, wie anhaltend wichtig es bleibt, diese Forschungsrichtungen zu entwickeln und zu pflegen bzw. in ihrer Funktion für andere Aspekte der Biodiversitätsforschung auszubauen.

Unbedingte Voraussetzung dafür ist der Erhalt der seit Jahrhunderten entwickelten Infrastrukturen wie Sammlungen, Museen, Botanische Gärten etc. und ebenso die Fortsetzung der Ausbildung (und spätere Anstellung!) junger Systematiker. Es muss für jede spezielle Organismengruppe wenigstens einen Spezialisten geben (in der Zoologie jetzt schon ein großes Problem!), der der Vielfalt Herr wird und die Arten benennen kann. Ansonsten wird die Biodiversitätsforschung sich eher auf einem oberflächlichen Niveau bewegen und die komplexe Vielfalt der Strukturen, die sie betrachten will, nicht erklären können.



Reaktion auf Veränderungen genannt werden. Alle diese anwendungsbezogenen Aspekte können jedoch nur auf der Basis solider Grundlagenforschung bearbeitet werden. Disziplinen wie Morphologie, Reproduktionsbiologie oder Naturstoffchemie sind und bleiben notwendig zur Charakterisierung von Organismen und zur Beschreibung ihrer Rolle im Naturhaushalt. Systematik und Taxonomie sind unverzichtbare Basiswissenschaften für die Biodiversitätsforschung. Sie erfassen, beschreiben und benennen die organismische Vielfalt und erarbeiten so das „Wörterbuch“, mit dessen Hilfe Biologen überhaupt erst kommunizieren können. Ebenso unverzichtbar ist dieses immer wieder dem aktuellen Stand der Forschung anzupassende Vokabular (= Tier-

und Pflanzennamen) für den Natur- und Artenschutz. Man kann nur schützen was man kennt! Systematiker erforschen darüber hinaus die Evolution und die Mechanismen, die zur Entstehung und Erhaltung von Lebensvielfalt führen. Beides ist sehr zeitaufwendig wegen der oft komplexen Vielfalt der Lebewesen, der häufigen Unzugänglichkeit ihrer Lebensräume und des intensiven Studiums des Materials wissenschaftlicher Sammlungen wie Herbarien, ohne deren Fundus an Material und Wissen über die Arten viele Arbeiten gar nicht möglich wären. Molekulargenetische Untersuchungen (DNA-Sequenzvergleiche) haben in den letzten Jahren große Beiträge zur Rekonstruktion der Stammesgeschichte (Phylogenie) geleistet. Gemessen an der Zahl

der Arten, ist aber die Zahl solcher Untersuchungen immer noch sehr begrenzt, vielfach sehr lückenhaft, wengleich die verfügbare Datenmenge rasant ansteigt. Die dabei rekonstruierten Aufspaltungereignisse bzw. die Entwicklung der Organismengruppen in Raum und Zeit sind aber nur auf der Basis klassischer Daten (z.B. aus der Anatomie und Morphologie, Karyologie, Biogeographie) interpretierbar. Schließlich können Fragen der Grundeigenschaften des Lebendigen oder Interaktionen mit anderen Organismen, von deren Kenntnissen die Menschheit großen Nutzen ziehen kann (z.B. für Ernährungsfragen oder medizinische Zwecke), ohne dieser Basiswissenschaften nur unzureichend erforscht werden. ■

Arbeiten im Herbarium von Rio de Janeiro, der wichtigsten Sammlung von Typusbelegen in Südamerika (Foto: Liederschumann).



Sarcostemma viminale
(Foto: Meve).

Der Ansatz, den wir in unserer Arbeitsgruppe verfolgen, ist vor allem die Merkmalsanalyse und die Erforschung der Stammesgeschichte der Schwalbenwurzgewächse (Apocynaceae-Asclepiadoideae), ausgewählter Rötengewächse (Rubiaceae) und Mittagsblumengewächse (Aizoaceae). Die Ergebnisse setzen wir um in eine verbesserte Taxonomie, die wiederum in Florenwerke, Checklisten oder online-Präsentationen einfließen und Anwendern zur Verfügung gestellt werden. Informationen zur Gattung *Cynanchum* in Afrika von Sigrid Liede, die Rötengewächse der Philippinen von Grecebio Alejandro oder Chromosomenzahlen der Schwalbenwurzgewächse von Ulrich Meve (mit F. Albers) sind Beispiele auf unseren Web-Seiten. Schwalbenwurzgewächse (Apocynaceae-Asclepiadaceae) zählen weltweit über 3000 Arten, die sich auf fünf Hauptgruppen verteilen. Von diesen bearbeiten wir vorrangig zwei (Tribus Asclepiadeae und Tribus Ceropegieae). Diese sind vor allem in den afrikanischen Subtropen und den Tropen Südamerikas zu ihrer größten Entfaltung gekommen. Es befinden sich keine herausragenden Nutzpflanzen unter ihnen. Die Ceropegieae-Gattungen *Stapelia* (Aasblume) oder *Ceropegia* (Leuchterblume) besitzen einen großen Bekanntheitsgrad und werden weltweit als Liebhaber-

pflanzen geschätzt. Trotz dieser Aufmerksamkeit, die vor allem den oft eigenartigen sukkulenten Wuchsformen und dem hochkomplexen Blütenbau der Asclepiadoideae, der mit einer entsprechend interessanten Bestäubungsbiologie einhergeht, zu verdanken ist, kennen wir bis heute die reale Artenzahl der Unterfamilie nicht genau. Während früher die Artenzahl auf eher 2500 geschätzt und kürzlich auf 3000 hochgerechnet wurde, gehen unsere Schätzungen nun dahin, dass sogar mit 4000 Arten zu rechnen sei. Dieses eine Beispiel mag bereits zeigen, wie groß immer noch die Lücken auch in der basalen Erfassung des Arteninventars in den Tropen klaffen und wie wenig vergleichbar die Situation mit einheimischen Regionen ist.

Die molekularen Untersuchungen erfolgen an unserem Lehrstuhl mit einem Kapillarsequenziergerät. Doch um gute Sequenzen zu bekommen, bedarf es auch guten Pflanzenmaterials, aus dem die DNA gewonnen werden kann. Manchmal reicht ein Stück Blatt von einem älteren Herbar-Bogen, jedoch ist Frischmaterial unbedingt vorzuziehen. Dieses Frischmaterial, das auch für eine Reihe weiterer Untersuchungen notwendig ist wie z.B. zur Blütenmorphologie, zu den Chromosomen oder zur Blütenduftanalyse mit Hilfe eines Gaschromatographen-Massenspektrometers (GC-MS), muss aufwendig durch Sammelreisen an die Originalstandorte oder durch Austausch beschafft werden. Um möglichst viele Untersuchungen durchführen zu können, kultiviert unser Lehrstuhl deshalb hunderte von (sub)tropischen Pflanzen im Gewächshaus.

Lehrstuhl



Prof. Liede-Schumann „angelt“ unterm First des Gewächshausdaches nach Knospen und Blüten von *Sarcostemma viminale* für ontogenetische Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (Foto: Meve).

Neue Einblicke in die Evolution bzw. Vegetationsgeschichte der Asclepiadoideae konnten wir aus molekularen und biogeographischen Analysen gewinnen: So gehen wir heute davon aus, dass Madagaskar frühzeitig mit einem Stock von *Cynanchum* (incl. *Sarcostemma*)-Arten ausgestattet gewesen sein muss, der sich in der Isolation und unter den besonderen ökologischen Verhältnissen auf der Insel zu einem neuen artenreichen Komplex entwickelt hat. Sekundär, d.h., durch jüngere Fernverbreitungsereignisse, stießen dann noch einzelne Arten hinzu, die sich nun erst langsam zu differenzieren und zu eigenständigen inseltypischen Arten zu entwickeln beginnen. Ebenso konnten wir nachweisen, dass selbst die tropisch-subtropische

Pflanzen systematik



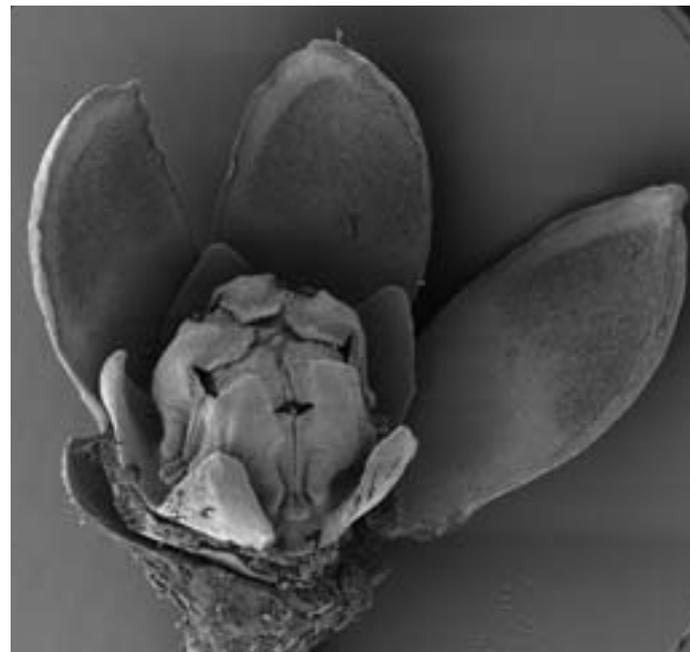
Doktorand Ulf Soltau bei der Analyse von Reproduktionssystemen von Unterwuchspflanzen im Bergregenwald in Süd-Ecuador (Foto: Soltau).

Sarcostemma viminalis, die sich fast jeden Winkel der Alten Welt als Lebensraum erobert hat und deshalb lange Zeit für gondwanischen Ursprungs gehalten wurde, primär einem dieser artenreichen madegasischen Komplexe angehört und von Madagaskar aus ihren Eroberungsfeldzug angetreten haben muss. Gerade umgekehrt ist die Situation in der Aasblumen-Gattung *Echidnopsis*, die ihr Entwicklungszentrum in Ostafrika hat und von dort aus (und auch von Arabien) die große vorgelagerte Insel Sokotra wenigstens dreimal unabhängig voneinander besiedelt haben muss. Die nördlichen Anden (Venezuela, Kolumbien, Bolivien, Ecuador) stehen im Fokus unserer Studien zur Systematik und Evolution des artenreichen *Cynanchum*-Kom-

plexes. Seine systematisch-taxonomische Erforschung ist zu einer besonderen Herausforderung für uns geworden, da die herkömmlichen molekularen Marker nicht selten gar keine Auflösung erbringen, d.h., die genetischen Unterschiede selbst zwischen morphologisch deutlich unterschiedlichen Sippen äußerst gering sind. Das spricht für eine sehr junge Radiation, unterstützt durch die räumliche Diversität, die die geologisch relativ jungen Anden bieten. Das schroffe Gelände sorgt dabei für geographische Isolation zwischen einzelnen Populationen und in der Folge für reproduktive Isolation als Grundvoraussetzung für Artbildung und schließlich für die Aufspaltung in neue, dann nur regional verbreitete Arten (→ Neoendemiten).

Die Vegetationsgeschichte der Karibik ist neuerdings wieder in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Durch die Anwendung einer „fingerprinting“-Methode (RAPDs), konnten wir herausfinden, dass es offensichtlich zu einer sukzessiven Besiedlung fast aller Inseln durch eine zarte Kletterpflanze (*Orthosia funale*) erst in jüngerer Zeit durch „Inselhopping“ (vermutlich angetrieben durch Hurrikans, die die windverbreiteten Samen verdriftet haben) gekommen ist. Heute werden wir Zeuge, wie *Orthosia funale* sich auf den einzelnen Inseln in neue Taxa aufzuspalten beginnt. Diese punktuellen Beispiele sollen zeigen, wie komplex und unterschiedlich selbst in nah verwandten Gruppen die Geschichte und Evolution verlaufen kann und wie unterschiedlich die ökosystemaren Funktionen der einzelnen Sippen deshalb zu bewerten sind. Der Erfolg der Biodiversitätsforschung,

die sich wie die Systematik selbst zu einem interdisziplinären und modernen Forschungsgebiet entwickelt, wird auch davon abhängen, inwieweit es gelingt, klassische und moderne Disziplinen zu verbinden und in eine neue Sicht der belebten Welt münden zu lassen, die letztlich auch für die Existenz des menschlichen Lebens von höchster Bedeutung ist. ■



Orthosia funale (Foto: Mangelsdorff).

Autoren:
Prof. Dr. Sigrid Liede-Schumann
Dr. Ulrich Meve

Lehrstuhl Pflanzen systematik
www.uni-bayreuth.de/departments/planta2

Links zum Artikel:
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Liede-Schumann>

DNA-Chips

moderne Diagnosewerkzeuge der molekularen Ökologie



Aus Bodenprobe
isolierte
Pilzhyphen.

An den Stoffkreisläufen im Boden ist eine Vielzahl unterschiedlicher mikrobieller Organismen beteiligt. Den zahlen- und massenmäßig bedeutendsten Anteil stellen Bakterien und Pilze. Trotzdem fehlen genauere Vorstellungen über Funktion und Populationsdynamik der meisten pilzlichen und bakteriellen Bodenorganismen.

Ein wichtiger Grund dafür ist, dass bodenbewohnende Organismen zum Teil nicht oder nur mit großem Aufwand im Labor zu kultivieren sind. Dies gilt besonders für Mikroorganismen, die Lebensgemein-

schaften mit anderen Organismen bilden. Ein Beispiel sind die als Wurzel-Mykorrhizen mit Waldbäumen vergesellschafteten Basidiumpilze, zu denen die meisten bekannten Waldpilze gehören. Ein weiteres Beispiel sind die so genannten Kommensalen oder Endosymbionten, die im Darmtrakt von Springschwänzen, Kurzflüglern und anderen Bodentieren vorkommen oder in speziellen Organbildungen (Myzetomen) von Bodentieren leben. Morphologisch-anatomische Merkmale und das Stoffwechsellpotential dieser Mikroorganismen sind kaum bekannt.

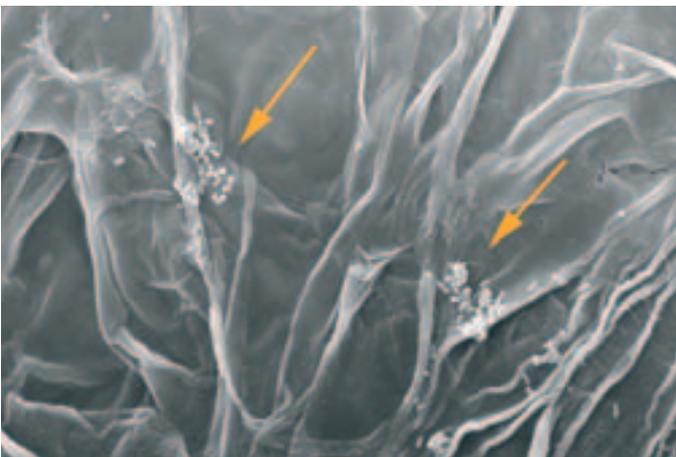
Bis vor kurzem musste sich die Bodenbiologie beim Studium der diversen Stoffkreisläufe in der Regel mit Bilanzmessungen begnügen. Die einzelnen Prozesse und physiologischen Aktivitäten der beteiligten Mikroorganismen sowie ihre exakte Lokalisierung im Boden waren meist nicht eindeutig darstellbar. Weiterhin konnten *in situ* beobachtete enzymatische Prozesse nicht den einzelnen Organismen zugeordnet werden. Dies galt selbst für Schlüsselprozesse wie zum Beispiel die Nitrifikation im Stickstoffkreislauf.

Erste molekularbiologische Ansätze erlaubten zwar mit DNA bzw. RNA aus Boden-Extrakten vorhandene Organismen bzw. aktive Gene nachzuweisen. Durch *in situ*-Hybridisierung mit fluoreszenzmarkierten Sonden konnten sie im Boden genau lokalisiert werden. Allerdings wurde die Analyse großer Datenmengen durch hohe Materialkosten und den immensen Zeitaufwand dieser Technik begrenzt.

Die Schwierigkeiten sind dank der Entwicklung von Microarrays (oder „DNA-Chips“) jetzt überwunden (siehe Kasten). Mit spezifischen Sonden können pro Chip viele tausend Zielorganismen und enzymkodierende Gene gleichzeitig nachgewiesen werden. Bei adäquater Analysendichte können so im Boden stattfindende Prozesse z. B. des Kohlenstoff- oder Stickstoffkreislaufs auf verschiedenen Ebenen charakterisiert, quantifiziert und integriert werden.

Ein solches Verfahren ist besonders hilfreich, um z. B. Störungen durch anthropogene Einflüsse rechtzeitig zu erkennen (globale Eutrophierung, Emission klimarelevanter NO_x-Gase, Änderungen des Stickstoff-Phosphor- bzw. des Stickstoff-Kohlenstoff-Verhältnisses in Böden). Ziel laufender Projekte ist deshalb das Design von Microarrays, mit denen sich sowohl die mikrobielle Diversität im Boden als auch das Expressionsmuster bakterieller und pilzlicher Schlüsselenzyme identifizieren lässt. Weiterhin sollen Microarrays dazu eingesetzt werden, Änderungen der Genexpression in Abhängigkeit von Umweltfaktoren und Stress zu analysieren. Die verschiedenen methodischen Ansätze erlauben es, das genetische und enzymatische Potential mit der tatsächlich stattfindenden Genexpressions-Aktivität zu korrelieren.

Die in Böden vorkommenden Bakterien und Pilze werden mit Taxon- bzw. Enzym-spezifischen Oligonukleotid-Sonden erfasst. Als „Taxa“ sind hierbei genetisch mehr oder weniger einheitliche Linien auf



Rasterelektronische
Aufnahme von
Bakterien auf
Innenseite des Vor-
derdarms einer
Insektenlarve.

den verschiedensten Verwandtschaftsebenen zu verstehen: Dabei werden im Allgemeinen artspezifische DNA-Sonden mit Gruppenspezifischen Sonden (auf der Ebene von Gattungen, Familien, Ordnungen und sogar Klassen) kombiniert. Die für höhere phylogenetische Ebenen spezifischen Sonden

erlauben über eine verwandtschaftliche Zuordnung hinaus auch den Nachweis noch unbekannter Taxa der jeweiligen Gruppe. Die Taxonspezifischen Sonden dienen ausschließlich dem Nachweis der vorhandenen (auch toten) Organismen, die Genspezifischen Sonden dem der aktiven Enzyme.

Von hohem bioindikativen Wert ist zum Beispiel der Nachweis der Transkripte („Messenger-RNA“) von Schlüsselenzymen der Stickstofffixierung (bakterielle Nitrogenasen) oder des Holzabbaus (pilzliche Laccasen oder Lignin-Peroxidasen). Kongruenzen von Signalen der Genexpression und phylogenetischen Markern erlauben Korrelationen der Enzymproduktion mit bakteriellen und pilzlichen Verwandtschaftslinien. So kann die Bedeutung einzelner mikrobieller Organismengruppen für den Kohlenstoff- und Stickstoffmetabolismus sowie weitere Stoffwechselprozesse im Boden nachgewiesen werden. Unterschiede in den Sequenzen enzymkodierender Gene bei verschiedenen Verwandtschaftsgruppen ermöglichen es theoretisch auch Taxon- und gleichzeitig Gen-spezifische Oligonukleotid-Sonden zu konstruieren. Fazit: Mit der DNA-Chip-Technik hat die Ökologie ein zukunftsträchtiges Diagnosewerkzeug zur Hand. Mit ihr können Zusammensetzung, Architektur und Aktivitäten mikrobieller Lebensgemeinschaften dargestellt werden. Diese Daten sind Voraussetzung, um den aktuellen Zustand von Böden charakterisieren und zukünftige Entwicklungen einschätzen zu können. ■

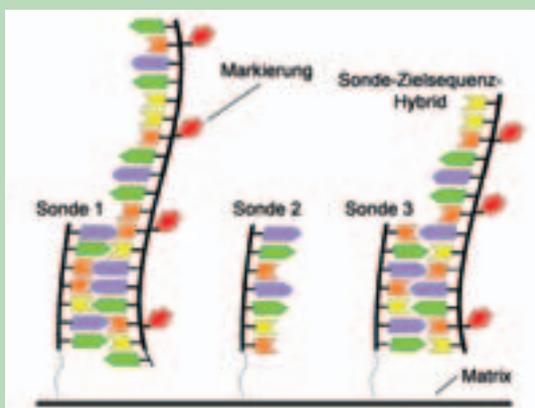
Flussdiagramm zur Etablierung und Verwendung von DNA-Chips zur molekularbiologischen Charakterisierung mikrobieller Lebensgemeinschaften.

DNA-Chips

DNA-Chips, auch Bio-Chips oder DNA-Microarrays genannt, können zur Identifikation von Mikroorganismen, zur Mutationsanalyse einzelner Gene und zu komplexen Genexpressionsanalysen eingesetzt werden. DNA-Chips bestehen aus einem planaren Trägermaterial, der Matrix, auf der einzelsträngige DNA-Fragmente bekannter Sequenz, die sogenannten Sonden, systematisch angeordnet sind. Mit Hilfe von Robotern werden hunderte bis tausende Sonden auf einer Glas-Matrix von wenigen Quadratzentimetern an definierten Stellen immobilisiert. Während eines Chip-Experimentes wird zunächst das zu analysierende Nukleinsäuregemisch mit



DNA-Arrayer Omnigrad 100: Print Head (a) mit Nadel (b) zum Drucken von Microarrays auf die Glasträger (c). Der Übersichtlichkeit wegen ist hier nur eine Nadel eingebaut.

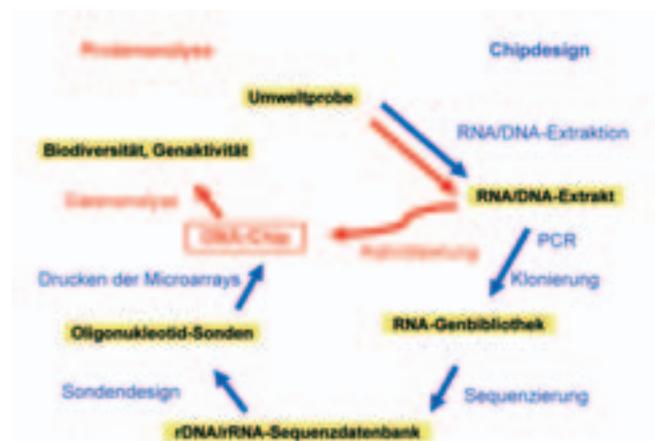


Schematische Darstellung der Hybridisierung auf einem DNA-Chip.

Fluoreszenzfarbstoffen markiert und dann unter geeigneten Bedingungen mit den auf dem Chip immobilisierten Sonden hybridisiert. Dabei binden die markierten Nukleinsäurefragmente mit ihren komplementären Bereichen an die Sonden. Sonde-Zielsequenz-Hybride werden über den Fluoreszenzfarbstoff detektiert.

Ein entscheidender Vorteil der DNA-Chip-Technik gegenüber klassischen molekularbiologischen Verfahren ist, dass gleichzeitig eine Vielzahl unterschiedlicher Gene bzw. Zielsequenzen in einem Nukleinsäuregemisch analysiert werden können.

Ausschnitt aus einem DNA-Microarray mit fluoreszenzmarkierter, an spezifischen Oligonukleotid-Sonden gebundener DNA.



Prof. Dr. Gerhard Rambold
Abteilung Mykologie und Lichenologie
www.bayceer.uni-bayreuth.de/Rambold

Tetrao urogallus

Aktenzeichen Auerhuhn & Co. ungelöst

Sterben Auerhühner zweimal?

Was wurde in den vergangenen Jahrzehnten nicht alles über den König des Fichtelgebirges, den Auerhahn mit seinen Hennen und ihren Lebensraum, gemutmaßt! Dass sie keine Überlebenschancen mehr hätten! Oder dass Auerhühner überhaupt nicht zur ursprünglichen Fauna des Fichtelgebirges gehören würden! Dann wurde öffentlich, dass der Wald nicht mehr so grün war, wie er zu sein hätte. Die alten

Das Fichtelgebirge als Knotengebirge für wandernde Pflanzen- und Tierarten (aus: www.Fichtelgebirge.de)

Wälder in den Hochlagen des Fichtelgebirges siechten dahin und wurden bis Ende der 1980er Jahre großteils aufgelichtet oder ganz geschlagen. Das Ende für die Auerhühner schien gekommen.

Aber es kam ganz anders: Ihr Bestand nahm zu, wohl eine Folge der Waldauflichtung – Auerhühner lieben offene, durchsonnte Wälder. Der Thüringer Raufußhuhnexperte Siegfried Klaus sprach gar von einer ungewöhnlich niedrigen „Halbwertszeit der Aussterberate“ des Auerhuhns im Fichtelgebirge. Dann nahm der Bestand langsam wieder ab.

1990 gründeten schließlich einige beherzte Forstleute und Vogelkundler den „Arbeitskreis Auerhuhn im Fichtelgebirge“. Sie sammelten Fakten über die Auerhühner und suchten Lösungen für deren Schutz. Und sie informierten die Einheimischen, die ihren Mythosvogel nicht verlieren wollten. Auf Neudeutsch hieß das „Auerhuhn goes politics“; der Landtag beschloss parteiübergreifend, dass dem Auerhuhn zu helfen sei.

Die Jahre gingen ins Land, die heimlichen Auerhühner schlichen weiter durch das Fichtelgebirge und gaben nolens volens Anlass zu neuen Fragen. Anno domini 2000 schickte die Bayerische Staatsforstverwaltung den Autor ins Fichtelgebirge mit dem Auftrag, alle Auerhühner dort aufschreiben zu lassen. So genau wie möglich! Ob sie noch eine Überlebenschance hätten? Was für den Rückgang verantwortlich sei? Und etwas Licht

sollte auch in ihre Vergangenheit gebracht werden. Und es ward etwas lichter.

Eine ungewöhnliche Position und ihre Folgen

Das Fichtelgebirge ist mit einer Fläche von gut 1000 Quadratkilometern eines der kleinsten Mittelgebirge Deutschlands. Trotzdem nimmt es als Knotengebirge im System der mitteleuropäischen Gebirge eine biogeographisch herausragende Position ein: Nach vier Richtungen grenzen andere Mittelgebirge an, was sowohl in der Vergangenheit als auch in der Gegenwart großräumige Wanderbewegungen von Organismen begünstigt hat.

Die Urform des Auerhuhns *Tetrao praeurogallus* kam schon seit dem Ende des Tertiärs in Bayern und Oberfranken vor. Während der Eiszeiten wichen Pflanzen und Tiere vor den Eis- und Firnmassen nach Süden aus, um in den Wärmezeiten wieder nach Norden vorzudringen. Dies führte zu einer Vermischung lokaler Populationen und damit zu einer erhöhten genetischen Vielfalt. Das „moderne“ Auerhuhn ist aus den Zwischeneiszeiten und der Nacheiszeit durch zahlreiche Fossilfunde nachgewiesen. Seit dem Ende der Eiszeit sind die Auerhühner in Oberfranken kontinuierlich heimisch. In den Jahren 2000 und 2001 wurde der Restbestand im Fichtelgebirge mit rund 60 Individuen beziffert. Das sind nicht viele Tiere



Bei Auerhühnern und ihren Verwandten sind die Läufe bis zu den Zehen befiedert, daher auch der Name Raufußhühner. Für die DNA-Analyse wird mit einem Skalpell eine winzige Gewebeprobe von der Unterseite einer Zehe von diesem ausgestopften Präparat entnommen.



– aber zu viele, um sie ohne Schutzmaßnahmen aussterben zu lassen. Pflanzen- und Tierzüchter wissen, dass hochgezüchtete Rassen anfällig für Krankheiten sind, während aus Kreuzungen verschiedener Rassen meist sehr vitale Individuen mit höherer Lebenserwartung hervorgehen.

Es ist deshalb eine plausible Arbeitshypothese, dass wiederholte Kreuzungen verschiedener Populationen eine überdurchschnittlich vitale Auerhuhnpopulation im „Knotenbahnhof“ Fichtelgebirge erzeugt haben. Dies würde erklären, warum die Auerhuhnpopulation im Fichtelgebirge langsamer abnimmt als in anderen Regionen. Ob tatsächlich eine überdurchschnittlich hohe genetische Diversität bei den Auerhühnern vorliegt, soll mit DNA-Analysen ermittelt werden.

Das Auerhuhn-Puzzle

Wir suchen Antworten auf folgende Fragen: Wie groß ist die genetische Vielfalt des Auerhuhns heute? Hat sie im Fichtelgebirge in den vergangenen 100 Jahren abgenommen? Sind die benachbarten Populationen auch verwandtschaftlich die nächsten? Lässt sich mit Wildfängen von dort die Überlebensfähigkeit des Auerhuhns im Fichtelgebirge steigern?

Für den „genetischen Finger-

abdruck“ lebender Vögel werden Mauserfedern verwendet, die an Balz- und Brutplätzen, in Mauserhabitaten, unter Schlafbäumen und anderen bekannten Aufenthaltsorten der Auerhühner gesammelt werden. Für die Charakterisierung früherer Populationen werden Gewebe von präparierten Auerhühnern herangezogen. Dazu werden Proben aus dem Großgefieder, der Flügelunterseite oder von der Fußunterseite genommen. Bisher wurden knapp 30 Auerhuhnpräparate aus dem Fichtelgebirge ausfindig gemacht. Es gibt aber sicher weitaus mehr, nach denen in Museen, Wirtschaftshäusern oder bei Privatleuten noch „gefangen“ wird.

Für die Typisierung der DNA werden etablierte Marker (Genorte) verwendet. Die Länge der Marker kann von Tier zu Tier unterschiedlich sein, wird aber in Stammbäumen konstant vererbt. Verwandte Tiere und Populationen lassen sich damit eindeutig kennzeichnen.

Ausblick*

Die Untersuchungen an den Auerhühnern sind Teil des Projekts „Grenzüberschreitender Biotopverbund für Raufußhühner zwischen Nordost-Bayern und Westböhmen“, das am BayCEER von den Biologen Dr. Pedro Gerstberger und August Spitznagel durchgeführt wird. Ziel ist es, Schutzkonzepte für die drei Raufußhuhn-Arten Auerhuhn, Birkhuhn und Haselhuhn in der Euregio Egrensis zu erstellen und umzusetzen.

Dazu sollen möglichst viele Lebensräume der drei Arten erhalten, renaturiert und untereinander vernetzt werden. Konkret geht es darum, Moore zu renaturieren, Waldquellen und Waldbäche freizustellen sowie alte lichte Hochlagenwälder zu erhalten und zu verbinden. Nach der Optimierung der Lebensräume kann der Bestand mittelfristig auch mit Wildfängen aus ausgewählten Populationen gestützt werden, um die Überlebensfähigkeit zu erhöhen.

Die angewandten Aspekte des von der EU kofinanzierten Interreg-III-Projekts werden mit den Regierungen von Oberfranken und der Oberpfalz, der Bayerischen Staatsforstverwaltung, den Naturparks sowie den Besitzern von Privat-, Gemeinde- und Körperschaftswald abgestimmt.

Auerhühnern sind „umbrella species“, in deren Lebensräumen auch zahlreiche andere gefährdete Arten vorkommen. Diesen Arten ist geholfen, wenn Auerhühner erfolgreich geschützt werden. Sie sind also feine Indikatoren für die Biodiversität von Gebirgswäldern. Damit reiht sich das Projekt in die Palette der Studien zur Biodiversität am BayCEER ein.

(* Ab 2005 sind eine Diplom- und eine Doktorarbeit zu vergeben.



Dipl.-Biol. August Spitznagel
Wissenschaftlicher Mitarbeiter BayCEER
www.bayceer.uni-bayreuth.de/Auerhuhn

Zeitreihenanalyse in der

Die spektakulären Hochwasserereignisse an der Elbe im August 2002 oder die Flutkatastrophe in Bangladesch 2004 sind uns allen noch vor Augen. Werden wir in Zukunft häufiger mit Hochwasser rechnen müssen?

Zeitreihenanalysen können Aufschluss darüber geben, wie sich umweltrelevante Daten über lange Zeiträume verändern. Dies ist im Kontext des globalen Wandels von zentraler Bedeutung. Am Lehrstuhl Ökologische Modellbildung werden in diesem Zusammenhang mit Methoden der *nichtlinearen Zeitreihenanalyse* unter anderem historische Änderungen von Abflüssen charakterisiert.

In einem BMBF-finanzierten Projekt zur „Skalenanalyse hydrologischer und meteorologischer Zeitreihen“ werden Langzeitdaten der Abflüsse von Gewässern in Süddeutschland untersucht. An dem Forschungsvorhaben sind neben der Universität Bayreuth das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung,

das Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft sowie die Universitäten Gießen und Tel Aviv (Israel) beteiligt.

Unsere Datengrundlage bilden Tagesmittelwerte von Abflussraten, die aus den Wasserständen von mehr als 300 Pegeln berechnet wurden. Viele dieser Messreihen sind mehr als 60, einige mehr als 100 Jahre lang. Sie bilden auch für die Wasserwirtschaft die wesentliche Grundlage zur Bearbeitung von Fragen der Art:

- Wie häufig sind an einem Ort Hochwässer, die einen bestimmten Abfluss-Grenzwert übersteigen?
- Haben sich diese Häufigkeiten im Laufe des 20. Jahrhunderts geändert?
- Gibt es Trends in den Daten? Wenn ja, welche Bereiche des Abflussgeschehens (Niedrigwasser, Mittelabfluss, Hochwasser) zeigen einen zunehmenden oder abnehmenden Trend?

Langzeitkorrelationen, Instationaritäten und kollektives Verhalten

Die Analyse der Abfluss-Zeitreihen mit Methoden aus der statistischen Physik zeigt: Die Abflüsse sind *langzeitkorreliert*. Weit zurückliegende Ereignisse haben also Einfluss auf das aktuelle Geschehen (das Ökosystem hat ein ausgeprägtes *Gedächtnis*). Die Korrelationen erstrecken sich über den gesamten verfügbaren Messzeitraum. Es ist höchst wahrscheinlich, dass sie noch weit darüber hinaus vorhanden sind.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist die Frage, ob sich die statistischen Eigenschaften der Zeitreihen über die Jahrzehnte ändern oder nicht - ob sie *stationär* sind. Hier zeigen unsere Analysen, dass die Abflüsse nahezu ohne Ausnahme *instationäres Verhalten* aufweisen, das weit über einen linearen Anstieg oder Abfall der mittleren Abflussrate hinaus geht.

Es stellt sich die Frage, welche der beobachteten Instationaritäten nur in einem einzigen Pegel auftreten und welche regionalen Charakter haben? Dazu haben wir ein Filterverfahren angewendet. Es kann aus den Messdaten die Anteile extrahieren, deren Periode beispielsweise länger ist als ein Jahr. Es zeigt sich, dass diese langperiodischen Anteile in sehr vielen Abflüssen Süddeutschlands *synchron* verlaufen, also zum Beispiel Maxima kollektiv auftreten. Das deutet auf einen gemeinsamen Ursachenkomplex hin, den wir weiter zu entschlüsseln versuchen. Es gibt bereits Hinweise, dass Schwankungen in großräumigen atmosphärischen Zirkulationen dabei eine bedeutende Rolle spielen.

Hochwasser in Tharandt im August 2002: in der Bildmitte der Cottabau der Forstwissenschaftlichen Fakultät. Die Weißeritz mündet in Dresden in die Elbe und verursachte die Überflutung des Hauptbahnhofs. Foto: Uwe Eichelmann, TU Dresden



Hochwasserforschung

Abschied vom „HQ100“

Bei den üblichen Modellen für Abfluss-Zeitreihen wird vorausgesetzt, dass wenige Werte aus der Vergangenheit genügen, um den Abfluss zu bestimmen (*Kurzzeitkorrelation*). Außerdem wird in aller Regel angenommen, dass die Abhängigkeit von früheren Werten linear ist. Unsere Ergebnisse zeigen, dass diese Annahmen nicht haltbar sind. Vielmehr beeinflussen zurückliegende Ereignisse das aktuelle Geschehen langfristig (*Langzeitkorrelation*, siehe oben). Das hat einschneidende Konsequenzen.

Erstens können bei den üblichen linearen Trendanalysen reine Langzeitkorrelationen leicht mit Trends verwechselt werden. Das kann zu riesigen Irrtümern bei Gefahrenabschätzungen führen.

Zweitens beruhen die für die Bemessung von Rückhaltebecken und Deichen verwendeten Hochwasserkennzahlen auf der Annahme, dass sich im Laufe etlicher Jahrzehnte die Hochwasserdynamik nicht ändert (*Stationarität*). Genau dies ist aber nicht der Fall. Ein Beispiel soll dies erläutern.

Die Grafik zeigt verschiedene Messstellen, für die langjährige Abfluss-

Zeitreihen zur Verfügung stehen. Für die erste Hälfte der Zeitreihen wurde ein Hochwasser mit - statistisch - hundertjähriger Wiederkehr ermittelt („HQ100“). Wird jetzt davon ausgegangen, dass die Entwicklung über die ganze Zeitreihe hinweg stationär ist, sollte dieser Pegel auch in der zweiten Zeitreihen-Hälfte statistisch nur alle hundert Jahre erreicht werden. Tatsächlich aber errechneten sich Werte zwischen 20 Jahren (Kochel) und 900 Jahren (Leutstetten). Daraus muss geschlossen werden, dass die Angabe eines HQ100-Wertes als Pegelmerkmal in aller Regel keinen Sinn macht.

Zudem setzt das Standardverfahren der Extremwertstatistik voraus, dass die einzelnen Hochwasser-Ereignisse völlig unabhängig voneinander sind. Das ist eine unberechtigte Vereinfachung. In den langzeitkorrelierten Datenreihen gibt es sowohl den Fall, dass Hochwässer sich in einem bestimmten Zeitraum häufen, als auch in anderen Zeiten deutlich seltener auftreten.

Ob sich Hochwasserhäufigkeiten im Laufe der letzten hundert Jahre tatsächlich systematisch verändert haben, können wir noch nicht beant-

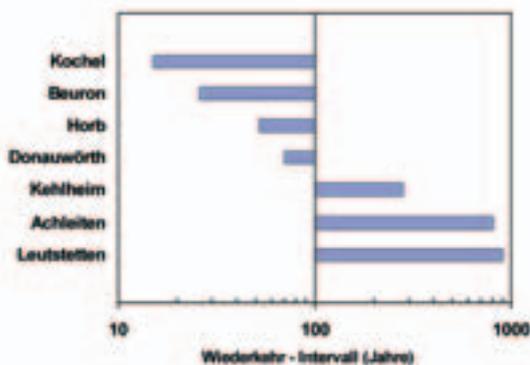
worten. Die bislang erzielten Ergebnisse geben dafür aber wenig Evidenz.

Die hier skizzierten neuen Verfahren der nichtlinearen Analyse berücksichtigen also im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren die gesamte Dynamik der ge-



*Gestrandet: Die ehemalige Meteorologie in Tharandt
Foto: Uwe Eichelmann, TU Dresden*

messenen Zeitreihen auf allen Zeitskalen. Die Abflussdaten zeigen dabei eine reichhaltige Struktur, die viel über das zugrunde liegende hydrologische Geschehen verrät. Die Entwicklung hierfür geeigneter Modelle ist eine echte Herausforderung für Hydrologen, Physiker, Mathematiker und Statistiker. Ein detailliertes Verständnis der Abflussdynamik ist ein wesentlicher Baustein der globalen wie regionalen Klimaforschung. ■



Unterschiede in den Wiederkehrintervallen von Hochwasserereignissen aus der ersten und der zweiten Datensatzhälfte. Das Wiederkehrintervall der ersten Datensatzhälfte beträgt 100 Jahre (Linie bei 100 Jahren).

Die Autoren:

*Prof. Dr. Holger Lange
Skogforsk (Norwegisches Waldforschungszentrum),
Ås, Norwegen
bis August 2003 Ökol. Modellbildung, BITÖK,
Universität Bayreuth*

*Dipl.-Geoökol. Birgit Thies
Ökol. Modellbildung, BITÖK, Universität Bayreuth
Homepage des Projektes „Skalenanalyse“:
<http://www.pik-potsdam.de/skalenanalyse>*

Fischer, Forscher, Landwirt – gemeinsam für bessere Wasserqualität im Weißenstädter Becken

„wasser-verbundet“ ist ein Verbundprojekt zur Verbesserung der Trinkwasser- und Badewasserqualität. Das Weißenstädter Becken dient hierbei als Modellgebiet, in dem stellvertretend für viele größere Regionen in Deutschland die verschiedenen Nutzungsformen und deren spezifische Probleme auf kleinem Raum vorliegen. Das Projekt wurde in den vergangenen drei Jahren von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Das Weißenstädter Becken

Im Fichtelgebirge zwischen Schneeberg und Waldstein liegt das Weißenstädter Becken, ein beliebtes Ziel für Wanderer und Wassersportler. Der 50 ha große Weißenstädter See zieht im Sommer Scharen von Badegästen, Anglern, Surfern, Seglern, Skatern und Spaziergängern an. Das liegt nicht nur an der idyllischen Lage, sondern auch am Weißenstädter See selbst:

Gut erschlossen durch einen Seerundweg, lässt sich der See per Fahrrad, Skates oder zu Fuß umrunden. Da der See mit maximal 3 Metern Wassertiefe sehr flach ist, erwärmt sich das Wasser im Sommer schnell auf angenehme 20°C. Das Weißenstädter Becken ist nicht nur ein beliebtes Naherholungsgebiet, sondern auch eines der größten Wassergewinnungsgebiete in Nordbayern: Aus

17 Tiefbrunnen werden bis zu 2 Mio. Kubikmeter Wasser pro Jahr gefördert, und damit knapp die Hälfte des Trinkwasser-Bedarfs der Stadt Hof abgedeckt. In Kombination mit der Land- und Forstwirtschaft, etwa 170 Fischteichen sowie diversen schützenswerten Moor- und Feuchtbiotopen ergibt sich so eine Verflechtung unterschiedlichster Nutzungsansprüche auf kleinstem Raum.

Insbesondere das Thema Wasserqualität birgt Konflikte: Erhöhte Nitrat- und Phosphat-Konzentrationen belasten die Wasservorkommen. Um das Weißenstädter Becken dauerhaft in seiner Vielfalt und Schönheit zu erhalten, müssen sich alle Beteiligten gemeinsam für den Erhalt der Grundwasser- und Seewasserqualität engagieren. Das Projekt wurde daher gemeinsam durchgeführt von der Stadt Weißenstadt, der HEW HofEnergie+Wasser GmbH, dem BITÖK und der GeoTeam GmbH.

Nitrat

Für die Grundwasser-Qualität ist es wichtig, die Nitratgehalte möglichst niedrig zu halten. Nitrat wird im Körper zu Nitrit umgewandelt und ist in höheren Konzentrationen insbesondere für Kleinkinder problematisch. Der EU-Grenzwert für Nitrat liegt bei 50 mg/l, der Richtwert bei 25 mg/l.

Nitrat gelangt hauptsächlich durch die Düngung von Acker und Grünland in den Boden und kann von dort aus ins Grundwasser ausgewaschen werden. Bereits seit 1996 werden im Auftrag der HEW

HofEnergie+Wasser GmbH Ausgleichszahlungen an die Landwirte im Wasserschutzgebiet geleistet. Diese nach dem Wasserhaushaltsgesetz vorgeschriebenen Zahlungen sind ein Ausgleich für die Nutzungseinschränkungen (z.B. Verbot der Gülle-Ausbringung), denen ein Landwirt im Wasserschutzgebiet unterliegt.

Im Auftrag der HEW HofEnergie+Wasser GmbH werden von der GeoTeam GmbH im Herbst die Nitratkonzentrationen auf besonders auswaschungsgefährdeten Flächen gemessen und die Landwirte in Abhängigkeit von den festgestellten Nitratwerten entlohnt. Durch dieses Verfahren werden die Landwirte zu einer Bewirtschaftung angeregt, die vor der Hauptauswaschungsperiode im Winter möglichst wenig Nitrat im Boden hinterlässt.

Phosphor

In Seen spielen die Phosphor-Konzentrationen eine große Rolle:

Wasserpflanzenansiedlung am Weißenstädter See





Renaturierung des Hirtenbachs: Längere Uferlinie - weniger Phosphor in den See

Algen brauchen diesen Nährstoff, um wachsen zu können. Ist die Phosphor-Konzentration zu hoch, dann kann es zu Algenblüten mit Ausscheidung giftiger Stoffwechselprodukte und letztlich zu einem Badeverbot kommen. Abgesehen davon verringert sich durch viele Algen die Sichttiefe und die in der EU-Badegewässer-Richtlinie geforderte Mindestsichttiefe von 1 m kann nicht mehr eingehalten werden.

Phosphor wird nicht nur von Äckern – v.a. durch Bodenerosion – in Gewässer eingetragen, sondern kann auch über die Abflüsse der 170 Fischteiche oberhalb des Sees oder aus stark versauerten Waldgebieten in den Weißenstädter See gelangen. Ein Messprogramm zur Klärung der Eintragungspfade ergab prozentuale

Einträge von ca. 46 % aus versauerten Waldböden, 44 % aus Bodenerosion 6 % aus Drainagen und 4 % aus Abwasser.

Welche Maßnahmen wurden unternommen?

Verminderung der Nitrat-Einträge ins Grundwasser

Nitrat gelangt entweder durch überschüssigen Dünger oder durch Umbruch bzw. Drainage und nachfolgendem Abbau organischer Substanz ins Grundwasser. Um die Auswaschung von Nitrat wirkungsvoll zu verringern, müssen die Landwirte entsprechend beraten werden und finanzielle Verluste, die z.B. durch geringere Erträge entstehen, ausgeglichen werden. Folgende Maßnahmen wurden umgesetzt:

- Weiterführung und Ausbau des Kooperationsvertrags zwischen Landwirten und Wasserversorger. Erarbeitung des neuen Kooperationsvertrags in der Arbeitsgruppe „Landwirtschaft und Gewässerschutz“
- Förderung des Winterzwischenfruchtanbaus als Kombinationsmaßnahme zur Verminderung von Nitratausträgen ins Trinkwasser und zur Verringerung der Bodenerosion

- Beratung der Landwirte durch einfach zu handhabende Simulationsprogramme (AckerTest, LandPrognos), die zeigen, wie sich verschiedene Nutzungsvarianten auf die Nitratgehalte und damit auch auf das eigene Einkommen auswirken.
- Aufbau der GIS-Anwendung WasserAgent: Jeder Landwirt kann seine Flächen anklicken und u.a. sehen, wie hoch die Nitratwerte und die angebotenen Prämien für deren Reduzierung sind.

Externe Maßnahmen zur Verminderung der Phosphor-Einträge:

Knapp die Hälfte des in den Weißenstädter See eingetragenen Phosphors stammt aus Hochwasser-Ereignissen. Daraus lässt sich als wichtigste Konsequenz ableiten, dass die Hochwasserspitzen bereits vor dem See abgefangen bzw. abgemildert werden müssen. Folgende Maßnahmen wurden im Einzugsgebiet der Weißenstädter See umgesetzt:

- Renaturierung des Hirtenbach-Einlaufs mit Anlage von Flachwasserzonen und Sedimentfalle
- Schaffung zusätzlicher Überschwemmungsflächen an der Eger (geplante Durchführung Herbst 2004)



Seeabfischung: Weniger Weißfische, mehr Plankton, weniger Algen

Fischer, Forscher, Landwirt – gemeinsam für bessere Wasserqualität im Weißenstädter Becken

- Beratung der Landwirte zur Erreichung einer maßvollen Phosphor-Gehaltsstufe der Böden im Einzugsgebiet des Sees, insbesondere auf drainierten Flächen (in Kooperation mit dem Landwirtschaftsamt Wunsiedel)
- Entwicklung der Internet-Anwendung „TeichTest“ zur Beratung von Teichwirten

Interne Maßnahmen zur Verminderung der Phosphor-Einträge:

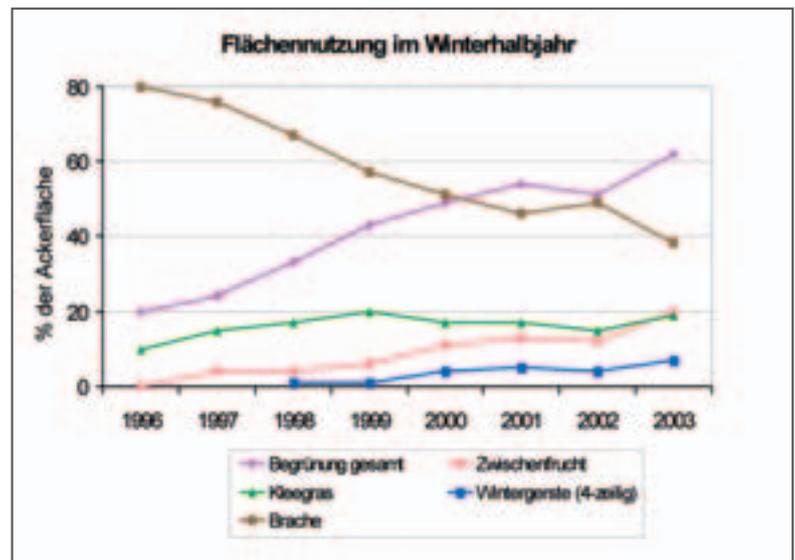
Durch Nahrungskettensteuerung und Strukturverbesserung lässt sich die Sichttiefe mäßig eutropher Gewässer positiv beeinflussen – auch dann, wenn der Phosphor-Eintrag aus dem Einzugsgebiet konstant bleibt. Zusammen mit dem Landesamt für Wasserwirtschaft wurden in der Arbeitsgruppe See-management folgende Maßnahmen koordiniert:

- Abfischung des Weißenstädter Sees am 18. Oktober 2003
- Winterung des Sees bis April 2004, Überwinterung von 14.000 Teichmuscheln in Fischteichen
- gezielter Wiederbesatz mit Raubfischen
- Ansiedlung von Wasserpflanzen auf mehreren 100 m Länge am Westufer des Sees

Die Maßnahmen wurden gefördert bzw. finanziert von der Stadt Weißenstadt, dem Bezirksfischereiverband Oberfranken und dem Naturpark Fichtelgebirge. Bei den Aktionen halfen ca. 80 Freiwillige, mehrere lokale Vereine, der Bauhof der Stadt Weißenstadt, der ABM-Trupp des Naturparks Fichtelgebirge und Mitarbeiter mehrerer Fachbehörden.

Mit den Landwirten ... und nicht gegen sie

Den oben genannten Maßnahmen liegt die Einsicht zugrunde, dass Ressourcenschutz letztlich nur mit den beteiligten Land- und Teichwirten, und nicht gegen sie durchgeführt werden kann. Zur Erhöhung der Akzeptanz ist es wichtig, die Auswirkungen der unterschiedlichen Nutzungen in der Öffentlichkeit bekannt zu machen. Der entscheidende Schritt ist jedoch die praktische Umsetzung: Sinnvoller Einsatz von finanziellen Mitteln zur Steuerung des Umweltverhaltens, intensive Beratung der Betroffenen und Öffentlichkeitsarbeit sind unabdingbar, um eine tatsächliche Verbesserung der Gesamtsituation zu erreichen. ■



Der Anbau von Zwischenfrüchten konnte erheblich gesteigert werden

Dr. Marion Mertens
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Abteilung Bodenphysik

Ansprechpartner und nähere Informationen findet man auf unseren Internet-Seiten unter www.wasser-verbindet.de

Ludwig Zöller

Neue Impulse für die Geomorphologie



Geomorphologie: Brücke zwischen Geoökologie und Erdkunde

Die Geomorphologie ist zusammen mit der Geologie ein essentielles Teilgebiet der Geoökologie. Sie beschäftigt sich mit der Entstehung der Oberflächenformen der Erde sowie den an der Erdoberfläche ablaufenden Prozessen, die das Relief und das oberflächennahe Substrat verändern. Zu solchen Prozessen gehören die Verwitterung und der Transport von Stoffen in fester und gelöster Form. Das Relief wirkt als Grenzfläche zwischen Lithosphäre, Pedosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre.

Ebenso wie niemand ernsthaft bestreiten kann, dass die Kenntnis unserer Geschichte unerlässlich für unser kulturelles Selbstverständnis und unsere eigene Standortbestimmung ist, halte ich die Kenntnis des Werdens unserer Umwelt in geologischen Zeiträumen für unverzichtbar.

Der Faktor Zeit und seine Messung – sowohl für die das Relief prägenden Ereignisse der jüngeren geologischen Vergangenheit („historische Zeit“ nach Frank Ahnert)

als auch für die Bestimmung von Prozessraten („physikalische Zeit“) – besitzt in der geomorphologischen Forschung herausragende Bedeutung. Die Geomorphologie hat in meinem Verständnis die besondere Aufgabe, die Auswirkungen vergangener geoökologischer Systemzustände auf aktuelle und zukünftige Systemzustände herauszustellen. Sie steht daher auch der Paläoklimatologie und der Paläoökologie nahe und erfordert interdisziplinäre Vernetzung in der Forschung.

So lassen sich zum Beispiel unsere heutigen Hangformen und Bodensubstrate verstehen, wenn wir die eiszeitlichen Systemzustände mit ihren zahlreichen Klimaänderungen kennen. Das Wissen um die Zusammenhänge schafft die Grundlage für nachhaltige Landnutzungskonzepte.

Die Geomorphologie ist in Deutschland traditionell ein Teilgebiet der Geografie. Diese hatte immer eine schwierige „Zwitterstellung“ zwischen Natur- und Geisteswissenschaften inne. In den letzten beiden Jahrzehnten ist eine Neuorientierung der Geografie als moderne umfassende Umweltwissenschaft zu beobachten, die menschliches (soziales) Handeln entscheidend einbezieht.

Ich sehe darin eine neue Chance für die Gesamt-Geografie und messe dem Schulfach Erdkunde eine hervorragende Bedeutung in der (Umwelt-) Erziehung junger Menschen zu. Daher engagiere ich mich in der Lehrerbildung, in die nach mei-

ner Überzeugung verstärkt geoökologische Themen einfließen müssen. Außerdem pflegt mein Lehrstuhl enge Kontakte zum Zentrum zur Förderung des mathematischen-naturwissenschaftlichen Unterrichts ZMNU der Universität Bayreuth. In den aktuell anstehenden Beratungen über neue Bachelor/Master-Studiengänge setze ich mich für eine verstärkte gegenseitige Öffnung und Vernetzung zwischen Geoökologie und Geografie ein.

Geheimnisse in den Sedimenten der Geschichte

Ablagerungen (Sedimente) sind für Geomorphologen wie ein Geschichtsbuch. Wenn alle Seiten vollständig sind, lässt sich die Entwicklung einer Landschaft sehr genau nachvollziehen. Interdisziplinäre Untersuchungen von Ablagerungen liefern Zeitreihen zur Rekonstruktion vorzeitlicher Umweltverhältnisse, Prozesse und Änderungen. Im Hinblick auf Analogien zu bevorstehenden Klima- und Umweltänderungen sind vor allem rapide Änderungen von Interesse. Besonders geeignet für die Untersuchungen sind Sedimente in Seen und Windablagerungen von Lössen. Auf den Kanareninseln Lanzarote und Fuerteventura wurden beispielsweise Ablagerungen von Saharastaub („Wüstenlöss“) in vulkanisch gebildeten Sedimentfallen untersucht und datiert. Sedimentfallen sind idealerweise geschlossene Hohlformen, in denen

Neue Impulse für die Geomorphologie

Profil aus Saharastaub-Ablagerungen mit fossilen Bodenbildungen und Kalkkrusten auf der Kanareninsel Fuerteventura (L. Zöller)

sich Ablagerungen durch Wind, Wasser, Schwerkraft beziehungsweise Eis akkumulieren können und nicht mehr erodiert werden. In den jüngeren Ablagerungen der letzten 5-10 000 Jahre treten plötzliche Veränderungen auf, die wir aufgrund von Knochenfunden importierter domestizierter Tiere als

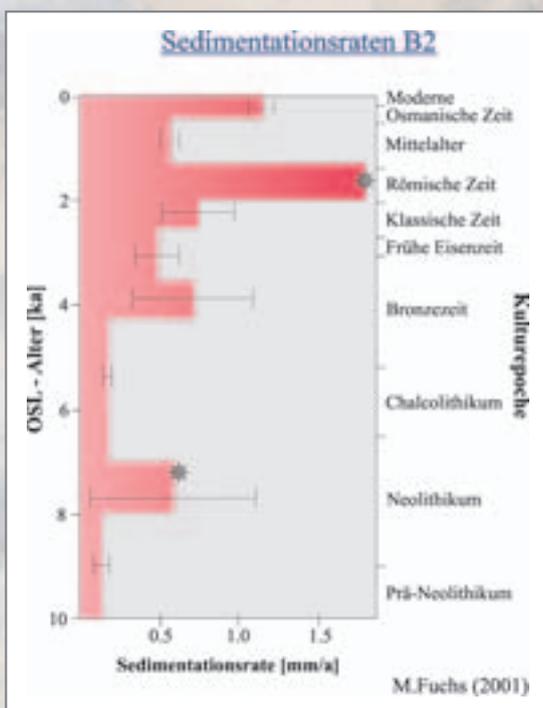
Auswirkungen früher Besiedlung auf das sensible Ökosystem der Halbtrockengebiete interpretieren. Die Besiedlung auf den Kanareninseln entwickelte sich in Abhängigkeit von natürlichen Klimaänderungen.

Forschungen zur zeitlichen Variabilität der Feuchteverhältnisse in der

lichen Strukturwandels und zu befürchtenden Klimawandels ähnlich schwerwiegende Eingriffe in den Landschaftshaushalt zu befürchten wie in der vorgeschichtlichen und geschichtlichen Vergangenheit. Parallel zu den Untersuchungen über die Löss-Ablagerungen wurden deshalb in einer Kooperation mit dem Lehrstuhl Stadtgeographie und Geographie des ländlichen Raumes mögliche Strategien eines nachhaltigen Tourismus im Biosphärenreservat Lanzarote entwickelt.

Untersuchungen über Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt in der Vergangenheit und über vorzeitliche Wechselbeziehungen zwischen Mensch und Umwelt werden neuerdings unter dem Begriff „Geoarchäologie“ zusammengefasst. In der Geoarchäologie werden geowissenschaftliche Methoden eingesetzt, um archäologische und kulturgeschichtliche Fragen zu beantworten. Ein Beispiel sind die Änderungen der Sedimentationsraten im Becken von Phlious in Griechenland seit Beginn der Jungsteinzeit. Die Sedimentationsrate durch Bodenerosion steht in engem Zusammenhang mit kulturellen Faktoren.

Die bisher dargestellten Beispiele zeigen, dass an einem Ort entlang



Geschichte der heutigen Trockengürtel der Erde können wertvolle Hinweise für Steuerungsmechanismen derartiger Änderungen geben. Gerade die ökologisch sehr sensiblen Ränder der Trockengürtel sind heute vielfach großem Bevölkerungsdruck ausgesetzt und stehen deshalb im Zentrum internationalen natur- und sozialwissenschaftlichen Forschungsinteresses.

Auf den Kanareninseln sind angesichts des aktuellen wirtschaft-

Rekonstruktion von Sedimentationsraten durch Bodenerosion im Becken von Phlious, Griechenland, seit Einführung des Ackerbaus in der Jungsteinzeit vor etwa 8000 Jahren. Die Sterne markieren Perioden starker Besiedlung.

Kurzlebenslauf Prof. Dr. L.

Ludwig Zöller wurde 1953 in Kirchen/Sieg geboren. Er studierte Geografie und Politikwissenschaft an der Universität Trier. 1983 promovierte er dort zum Dr. rer. nat. mit einem geomorphologisch-quartärgeologischen Thema.

Nach einer Assistentenzeit an der Universität des Saarlandes kam er 1985 als Gastwissenschaftler ans Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und baute dort gemeinsam mit Professor Günther A. Wagner die erste deutsche Arbeitsgruppe zur Thermolumineszenz-Datierung von Sedimenten auf. Diese Arbeiten führte er als Wissenschaftlicher Angestellter der „Forschungsstelle Archäometrie“ der Heidelberger Akademie der



Erosion im südlichen Olt-Tal, Rumänien (U.Hambach). Zwischen hellen Löss-Schichten, die auf trockenes Klima hinweisen, liegen dunklere Paläoböden. Die dunklen Böden sind charakteristisch für Phasen, in denen Niederschlag stärkeren Pflanzenbewuchs ermöglichte.

eines zeitlichen Gradienten Zusammenhänge zwischen Ablagerungen und Klimaänderungen beobachtet werden können. Bisher aber gibt es nur wenige Untersuchungen darüber, inwieweit diese Zusammenhänge entlang räumlicher Gradienten variieren. Dies ist für Prognosen von entscheidender Bedeutung. So ist das Paläoklima in West- und Mitteleuropa zwar ausführlich beschrieben, für Osteuropa aber gibt es kaum Daten. Im März

2004 hat der Lehrstuhl Geomorphologie deshalb in Kooperation mit der Universität von Novi Sad in Serbien und weiteren Arbeitsgruppen in Ungarn und Rumänien mit Forschungsarbeiten zur „Rekonstruktion des Paläoklimas aus Lössablagerungen des südlichen Karpatenbeckens“ begonnen. Mittelfristiges Ziel ist ein Transsekt von Südungarn bis ans Schwarze Meer über das Paläoklima der vergangenen 300 Tausend Jahre. ■

Ludwig Zöller

Wissenschaften fort und habilitierte 1995 an der Fakultät für Geowissenschaften in Heidelberg für das Fach Geografie. Nach mehreren Lehrstuhlvertretungen nahm er zum Oktober 1997 den Ruf an eine C3-Professur für die Physische Geografie in Bonn an.

Seit 1. März 2002 ist er Inhaber des Lehrstuhls Geomorphologie an der Universität Bayreuth. Hier erfüllte er sich einen lange gehegten Wunsch: die Verbindung eines Labors für Lumineszenz-Datierung mit einem Labor für Paläo- und Umweltmagnetik (PUM) an einem Lehrstuhl. Dazu konnte er mit Dr. Ulrich Hambach und Dr. Markus Fuchs zwei ausgewiesene Experten gewinnen.

[Prof. Dr. Ludwig Zöller, Lehrstuhl Geomorphologie
Universität Bayreuth, D 95440 Bayreuth
Tel.: +49-921-55-2266, Fax -2314
<http://www.uni-bayreuth.de/departments/geomorph/>]

Methoden:

Eine Voraussetzung für die Interpretation der Ergebnisse ist, die Ablagerungen und ihre Genese zu charakterisieren und zu datieren. Der Lehrstuhl Geomorphologie steuert folgende Verfahren bei:

- sedimentologische Analysen zur Charakterisierung der Genese der Ablagerungen;
- Lumineszenzdatierungen der Ablagerungen; der Datierungszeitraum reicht je nach Material und natürlicher Radioaktivität der Probe und ihrer Umgebung von einigen hundert bis zu einigen hunderttausend Jahren;
- Datierungen mittels Paläomagnetik und Korrelation mit hoch auflösenden datierten Archiven (wie Eisbohrkernen) über umweltmagnetische Parameter;
- umweltmagnetische Charakterisierung der Ablagerungen liefern annähernde Daten über klimatische und andere umweltrelevante Verhältnisse;
- Quantifizierung der Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten (einige ha) seit etwa 1960 nach der Radiocäsium-Methode.

Stabile Isotope in der

Viele chemische Elemente existieren als verschiedene stabile Isotope. Stabile Isotope eines Elements sind Atome gleicher Ordnungszahl und unbegrenzter Lebensdauer, die verschiedene Kernmassen besitzen. Sie sind nicht radioaktiv. Die verschiedenen Isotope sind nicht gleich verteilt. Meist gibt es ein dominantes Isotop mit einer relativen Häufigkeit von 90 bis 100 Prozent. Das charakteristische Verhältnis zweier Isotope eines Elementes wird Signatur genannt.

In der Tabelle sind globale Mittelwerte angegeben. An unterschiedlichen Orten und in unterschiedlichen Verbindungen

Element	Massenzahl	Häufigkeit (%)
Wasserstoff	1	99,985
	2	0,015
Kohlenstoff	12	98,89
	13	1,11
Stickstoff	14	99,64
	15	0,36
Sauerstoff	16	99,76
	17	0,036
	18	0,205

Unterschiedliche relative Häufigkeit verschiedener stabiler Isotope von vier Elementen. Angegeben sind globale Mittelwerte.

kann die relative Verteilung (Signatur) aber deutlich abweichen. Das liegt daran, dass die verschiedenen Isotope eines Elementes bei physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen mit unterschiedlichen Raten umgesetzt werden. In der Regel wird das leichtere Isotop bevorzugt. Das hat Änderungen im natürlichen Isotopenverhältnis zur Folge. Stabile Isotope sind so ideale Tracer für Herkunft, Verweilzeit und Umsatzprozesse organischer Verbindungen in der Umwelt.

Seit einigen Jahren ist es nun möglich, nicht nur Gesamtproben auf stabile Isotope (¹³C, ¹⁵N, ¹⁸O, ²H) zu untersuchen,

Bruno Glaser

Unbestechliche Zeugen

Stabile Isotope in der bodenkundlichen Forschung



Freilandexperiment zur Untersuchung erhöhter CO₂-Konzentration in der Luft (Free air carbon dioxide enrichment, FACE) an der ETH Zürich. Mit diesem Experiment werden Auswirkungen des vor allem durch Verbrennung fossiler Energien verursachten anthropogenen Treibhauseffektes untersucht.

Schadstoffe zu messen ist Routine von Umweltanalytikern. Offen aber blieb bis vor kurzem häufig, welche Prozesse in welchem Ausmaß für Schadstoffanreicherungen verantwortlich waren. Am Lehrstuhl für Bodenkunde und Bodengeographie wurden in den vergangenen vier Jahren routinetaugliche Methoden der Analyse stabiler Isotope entwickelt (Hintergrund siehe „Stabile Isotope in der Umweltforschung“). Mit ihnen kann die Isotopensignatur terrestrischer, aquatischer, pflanz-

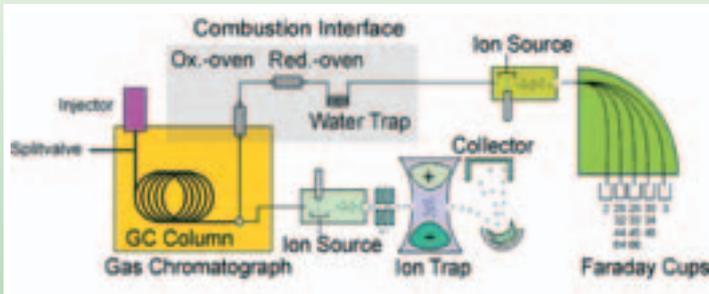
licher beziehungsweise mikrobieller Marker nachgewiesen werden. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Herkunft der Schadstoffe und anderen Verbindungen. Die Methoden werden für unterschiedlichste umweltrelevante Fragen angewendet:

So wird zur Zeit fieberhaft nach Strategien gesucht, um das klimawirksame Treibhausgas Kohlendioxid zu reduzieren. In früheren Untersuchungen hatten die Mitarbeiter des Lehrstuhls gezeigt, dass stabile, hocharomatische Verbindungen im Boden (engl. black carbon) bei unvollständiger Verbrennung entstehen. Diese Verbindungen werden im Boden kaum abgebaut. Mit Hilfe der Isotopen-Untersuchungen ließ sich jetzt nachweisen, dass black carbon in signifikanten

Mengen auch biologisch gebildet wird. Die Förderung dieser biologischen Prozesse könnte eine effektive Strategie sein, den Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre zu reduzieren.

In der Literatur gibt es zahlreiche Hinweise auf eine Stabilisierung von mikrobiellen Rückständen im Boden. Allerdings ist das Ausmaß und der zeitliche Rahmen einer solchen Stabilisierung völlig unbekannt. Das ist vor allem auf methodische Grenzen zurückzuführen. Mit konventionellen Methoden wie zum Beispiel Gaschromatographie und Flammen-Ionisationsdetektion ist es nämlich nicht möglich, zwischen schon im Boden vorhandenen (alten) und rezent gebildeten (neuen) mikrobiellen Produkten zu unter-

Umweltforschung



Funktionsweise eines Gas-Isotopen-Massenspektrometers mit Peripherie für Biomarker-Analysen. Bei bodenkundlichen Untersuchungen wird damit zum Beispiel die Herkunft von organischen Verbindungen identifiziert oder das Ausmaß deren Neubildung bzw. deren Umsatz sicher nachgewiesen.

Autoren

Unbestechliche Zeugen

Dr. Bruno Glaser

Wiss. Mitarbeiter Lehrstuhl

Bodenkunde und Bodengeographie

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Glaser>

Partnertausch im dunklen Wald

Prof. Dr. Gerhard Gebauer

Wiss. Mitarbeiter Lehrstuhl Pflanzenökologie

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Gebauer>

Woher kommt das CO₂?

Johannes Ruppert

Wiss. Mitarbeiter Abteilung Mikrometeorologie

<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm>

sondern auch physikalische und chemische Fraktionen (komponenten- bzw. substanzspezifische Analyse stabiler Isotope). Mit Gas-Isotopen-Massenspektrometern (engl. Gas isotope ratio mass spectrometry, IRMS) können simultan bis zu drei stabile Isotope gemessen werden. Das erlaubt eine sichere Detektion von kleinsten Än-

derungen der Isotopenverhältnisse. Die Untersuchungen dienen im Wesentlichen zwei prinzipiellen Zielen: dem spezifischen Nachweis der Herkunft organischer Verbindungen (engl. Environmental Forensics) sowie der Verweilzeit und dem Ausmaß der Festlegung dieser Verbindungen (engl. Turnover and sequestration). ■

scheiden, da es sich ja um identische Moleküle handelt. Mit Hilfe der Signatur der stabilen Isotope in den mikrobiellen Produkten wie Aminosäuren lassen sich die neu gebildeten mikrobiellen Produkte quantifizieren, wenn mit Isotopen markierte Substrate angeboten werden (Isotopenmarkierung).

Fragen darüber, in welchem Ausmaß der Kohlenstoff im Boden festgelegt wird oder wie hoch der Umsatz von organischen Substanzen im Boden ist, sind vor dem Hintergrund eines sich ändernden Klimas extrem brisant. So ist zum Beispiel bislang ungeklärt, ob eine Temperaturerhöhung aufgrund steigender atmosphärischer Kohlendioxid-Konzentrationen zu einer erhöhten Biomasseproduktion und damit zu einer vermehrten Festlegung von Kohlenstoff im Boden führt. Es ist genauso gut denkbar, dass die erhöhte Temperatur die Mineralisationsraten erhöht und deshalb verstärkt Humus abgebaut wird. Das würde zu zusätzlichen Kohlendioxid-Emissionen führen und den Treibhauseffekt weiter verstärken.

In einem Freilandexperiment in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich wird deshalb eine erhöhte atmosphärische Kohlendioxid-Konzentration (Free Air Carbondioxide Enrichment, FACE-Experiment) mit ¹³C-abgereichertem Kohlendioxid simuliert. Es konnte zwar eindeutig nachgewiesen werden, dass nach sieben Jahren etwa 30 Prozent der mikrobiellen Rückstände aus dem zusätzlichen Kohlendioxid gebildet wurden, eine signifikante Erhöhung der Kohlenstoff-Festlegung im Vergleich zur Kontrolle war aber nicht zu beobachten. Die Umsatzraten der mikrobiellen Rückstände betragen 2 bis 50 Jahre.

Eine weitere Arbeit befasste sich mit der Zuordnung von organischen Schadstoffquellen wie zum Beispiel polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Stadtgebiet von Bayreuth. PAKs entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung. Sie sind Bestandteil sowohl von Autoabgasen als auch von industriellen und häuslichen Emissionen. Jede verwendete Energiequelle (Benzin, Diesel, Kohle, Holz

etc) trägt ihr eigenes Muster an stabilen Isotopen. Die neuen Analysemöglichkeiten erlauben eine Identifizierung und Quantifizierung des Beitrages der verschiedenen Emittenten. Aus den Ergebnissen lassen sich effiziente Strategien zur Minimierung des Schadstoffeintrages ableiten. Außerdem ist eine gezielte Ahndung der Verursacher möglich. Auch die Klima- und Landschaftsgeschichte kann mit stabilen Isotopen näher charakterisiert werden. In einem etwa 15000 Jahre alten Seesedimentkern aus dem Gorkha Himal (Nepal) konnte mit Hilfe der substanzspezifischen ¹³C-Signatur Steppenvegetation nachgewiesen werden. Im Holozän einige tausend Jahre später herrschte dagegen Waldvegetation vor. Steppenvegetation zeigt trockeneres und in der Regel wärmeres Klima an. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die mittlere Temperatur nach dem Abschmelzen des Hochglazialgletschers bereits mehr als 10°C betrug. ■

Dr. Bruno Glaser, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Bodenkunde und Bodengeographie, Universität Bayreuth
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Glaser>

Gerhard Gebauer

Partnertausch

Stabile Isotope geben neue Ernährungsverhalten



Die Breitblättrige Stendelwurz
(Foto: Bastian Burghardt)

Die meisten Pflanzen gehen mit Pilzen eine enge Partnerschaft ein – die Mykorrhiza. In der Regel versorgen dabei die Pflanzen den Pilzpartner mit Kohlenstoffverbindungen aus der Photosynthese und erhalten im Gegenzug mineralische Nährstoffe, die der Pilzpartner über sein Mycel aus dem Boden effizienter aufnehmen kann. Diese mutualistische Beziehung wird weltweit von einigen hundert Pflanzenarten unterlaufen, die chlorophyllfrei sind und somit keine Photosynthese mehr betreiben. Diese Ernährungsweise auf Kosten des Pilzpartners wird als Mykoheterotrophie bezeichnet. Sie ist insbesondere bei Orchideen verbreitet.

Trotz der bekanntermaßen mykoheterotrophen Ernährung mancher chlorophyllfreier Orchideenarten wird für adulte, grünblättrige Orchideen eine vollständig autotrophe Ernährung angenommen. Häufigkeitsanalysen der stabilen Kohlenstoff- und Stickstoffisotope liefern neuerdings Hinweise, dass viele der scheinbar autotrophen Orchideen sich teilweise auch auf Kosten des Pilzpartners ernähren. Diese teilweise Mykoheterotrophie ist mit einem Wechsel des Pilzpartners verbunden und erlaubt den Orchideen ein Vordringen in den dunkelsten Schatten von Wäldern.

Mit mehr als 20.000 bekannten Arten ist die Familie der Or-

chideengewächse die artenreichste Familie im Pflanzenreich. Im Laufe der Evolution ist es den Orchideen wie keiner anderen Pflanzenfamilie gelungen, ein breites Spektrum von Lebensräumen in den verschiedensten Klimaten zu besiedeln. Die Verbreitung der Orchideen erstreckt sich von den Tropen bis in die subarktische Tundra. Gleichzeitig sind viele Orchideenarten aber auch sehr selten und mancherorts vom Aussterben bedroht. Nicht nur aufgrund ihrer häufig faszinierenden Blüten sind Orchideen somit von besonderem Interesse in der gegenwärtigen Diskussion um Artenschutz und Biodiversität.

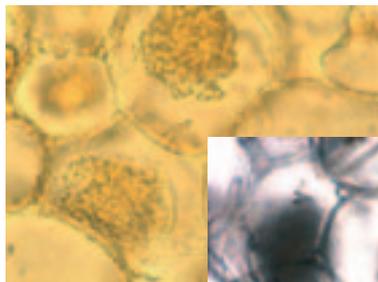
Ein Charakteristikum aller Orchideen sind ihre winzigen Samen, die keinerlei Speicherstoffe enthalten. Schon bei der Samenkeimung sind sie vollständig auf die Versorgung durch einen geeigneten Pilzpartner angewiesen. Bereits 1909 wurden von dem französischen Naturforscher Noel Bernard leicht kultivierbare, im Boden saprophytisch lebende Pilze aus der als *Rhizoctonia* bezeichneten Formengruppe als typische Pilzpartner der Orchideen-Mykorrhiza identifiziert. Diese Pilzpartner versorgen die Orchideen-Jungpflanzen vom Keimlingsstadium an mit Nährstoffen, indem sie bis in das Zellinnere der Orchideenwurzel wachsen und dort

Mycelknäuel bilden. Sie werden von der Orchideen-Jungpflanze regelrecht "verdaut". Dieses Ernährungsverhalten wird von den chlorophyllfreien Orchideen auch im adulten Stadium beibehalten. Grünblättrige Orchideen sind dagegen nicht mehr zwangsläufig auf eine Versorgung durch den Pilzpartner angewiesen und geben häufig den Kontakt zum Pilz völlig auf. Manche unserer einheimischen Orchideen sind als extrem schattentolerante Waldbewohner bekannt. So kann man beispielsweise das Weiße Waldvögelein auch noch im tiefsten Dunkel dichter Buchenwälder ohne jegliche Begleitflora finden. Es stellt sich die Frage nach der Ursache dieser extremen Schattentoleranz. Daten aus der Häufigkeitsanalyse der stabilen Isotope des Kohlenstoffs und Stickstoffs in Verbindung mit molekularbiologischen Analysen geben eine Antwort. Pflanzen, die ihren Kohlenstoffbedarf aus der Photosynthese und ihren Stickstoffbedarf durch Aufnahme von Nitrat und Ammonium aus dem Boden decken, besitzen charakteristische Isotopenhäufigkeiten. Pilze dagegen

unterscheiden sich auffällig in ihrer Kohlenstoff- und Stickstoffisotopen-



Grünes (li.) und Albino Weißes Waldvögelein



Mycelknäuel von Pilzen in den Wurzelzellen von Orchideen
(Foto: Markus Meyer o. und Cornelia Meyer, u.)

im dunklen Wald –

Einblicke in das geheimnisvolle von Orchideen



Exemplar (rechts) des
(Foto: M.-A. Selosse)

häufigkeit von der Mehrheit der Pflanzen. Chlorophyllfreie und damit mykoheterotrophe Orchideen, wie beispielsweise die in unseren Wäldern häufig anzutreffende Vogel-Nestwurz, besitzen Isotopenhäufigkeiten, die sie von grünen Begleitpflanzen grundlegend unterscheiden, die aber gleichzeitig den sie ernährenden Pilzen ähnlich sind.

Scheinbar autotrophe Waldorchideen, wie etwa Vertreter aus den Gattungen

Waldvögelein und Stendelwurz, weisen Isotopenhäufigkeiten auf, die eine auffällige Zwischenposition zwischen Nicht-Orchideen einerseits und offensichtlich mykoheterotrophen Orchideen andererseits einnehmen. Je lichtlimitierter der Standort dieser scheinbar autotrophen Orchideen ist, umso mehr nähert sich ihr Isotopenwert den mykoheterotrophen Orchideen an.



Das Rote Waldvögelein
(Foto: Gerhard Gebauer)

Es liegt nahe, aus den Isotopendaten zu folgern, dass viele unserer einheimischen Waldorchideen ein für Pflanzen bisher unbekanntes Ernährungsverhalten besitzen. Je nach Lebensbedingung können sie offenbar zwischen Photosynthese (autotrophe Ernährung) und Pilzverdauung (mykoheterotrophe Ernährung) wechseln. Abschätzungen aus den Isotopendaten deuten darauf hin, dass der Beitrag aus der mykoheterotrophen Ernährung bis zu 85% erreichen kann.

Die Interpretation der Isotopendaten wird durch zwei weitere Beobachtungen bestätigt:

- (1) Molekulargenetische Untersuchungen belegen, dass der Übergang von autotropher zu fakultativ mykoheterotropher Ernährung mit einem Tausch des Pilzpartners im Wurzelraum der Orchideen einhergeht. Wahlweise

oder obligat mykoheterotrophe Orchideen besitzen als Partner Pilzarten, die bekanntermaßen mit Bäumen eine Ektomykorrhiza eingehen. Es entsteht somit ein Stofffluss vom Baum über den Pilz zur Orchidee.

- (2) Vereinzelt lassen sich in Wäldern weißblättrige Varietäten von eigentlich grünblättrigen Orchideenarten finden. Diese Albino-Varietäten unterscheiden sich in ihrem Wachstum nicht von grünblättrigen Individuen und besitzen Isotopenhäufigkeiten, die sie einer vollständig mykoheterotrophen Ernährung überführen. Albino-Varietäten des Weißen Waldvögeleins wurden im letzten Sommer auch im Umland von Bayreuth gefunden. ■

Die Vogel-Nestwurz – eine chlorophyllfreie, mykoheterotrophe Orchidee der europäischen Wälder (Foto: Gerhard Gebauer)



Die Fliegen-Ragwurz - eine Orchidee lichter Kiefernwälder. Diese Art nutzt aufgrund der für die eigene Photosynthese günstigeren Lichtverhältnisse ihres Standorts vorwiegend Stickstoff aus der fakultativ mykoheterotrophen Ernährung (Foto: Gerhard Gebauer)



Woher kommt das CO₂?

¹³C und ¹⁸O Isotopenflüsse über Ökosystemen in bisher unerreichter Präzision

Das Bayreuther Relaxed-Eddy-Accumulation-System für die Messung von Isotopenflüssen im Labortest am Max-Planck Institut für Biogeochemie in Jena. Insbesondere die Verwendung von Mylar® Folienballons als Zwischenreservoirs für die Luftproben anstelle von Kältefallen machte die erhebliche Präzisionssteigerung des Systems möglich.

Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und das Kyoto-Protokoll verpflichten die europäischen Länder, zwischen 2008 und 2012 die Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) um mindestens 8 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Laut Kyoto-Protokoll sollen auch jene CO₂-Mengen erfasst werden, die als Biomasse in Wäldern und Böden gebunden werden können.

Es wird angenommen, dass Wälder weltweit etwa ein Drittel der menschlichen CO₂-Emissionen aufnehmen. Die Rolle dieser biolo-

gischen „Kohlenstoffsinken“ in Vegetation und Böden führte bei der Implementierung des Kyoto-Protokolls zu heftigen Diskussionen zwischen Wissenschaftlern und Politikern.

Bei der Photosynthese nehmen Waldbäume am Tage Kohlenstoff auf (Assimilation). Er wird bei der Atmung vorwiegend in der Nacht in Form von CO₂ wieder teilweise freigesetzt (Respiration). Der Rest wird von den Pflanzen zurückgehalten, für den Aufbau der Biomasse (Holz) verwendet und gespeichert. Waldökosystemen kommt dabei im Vergleich zu anderen terrestrischen Ökosystemen die mengenmäßig größte und zeitlich längste Anhäufung von Phytomasse zu.

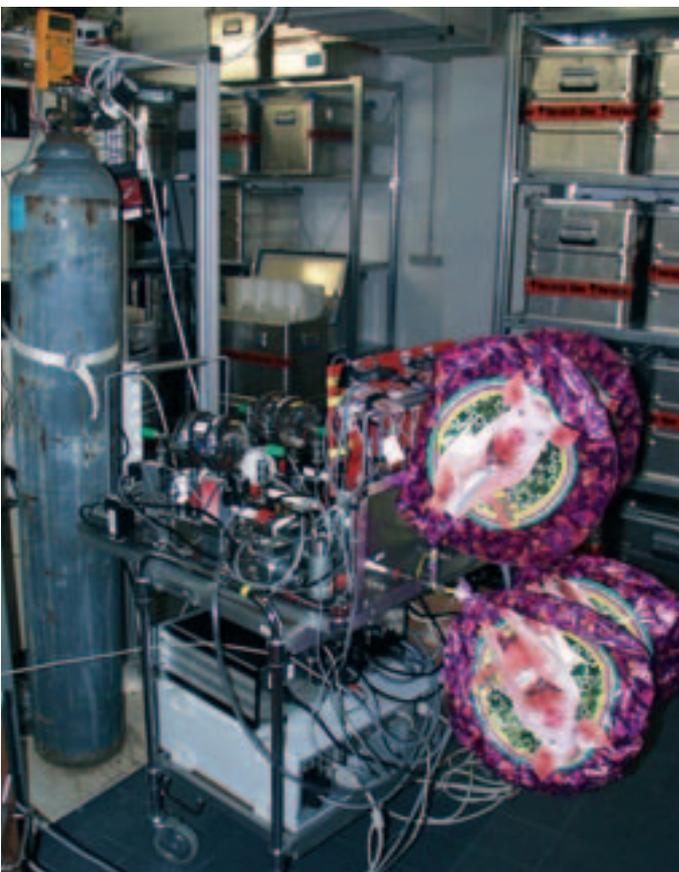
CarboEurope ist ein europäisches Cluster von Forschungsprojekten zum Thema Kohlenstoffbilanzen. Die Abteilung Mikrometeorologie und das BITÖK sind an diesem Projekt beteiligt.

Bei den Untersuchungen nutzen wir die Tatsache, dass Kohlenstoff in zwei verschiedenen stabilen Isotopen ¹³C und ¹²C vorkommt. Das CO₂ aus der Atmosphäre hat eine andere Isotopen-Zusammensetzung (Signatur) als das CO₂, das aus der Biomasse bei der Atmung freigesetzt wird. Aus dieser Signatur und der Mengenbestimmung des CO₂-Umsatzes in einem Waldbestand können wir dann Aussagen über die augenblickliche Bilanz des Kohlenstoffs für einen Wald treffen. Die ¹³C-Profilmessungen und ¹³C-Flüsse liefern wertvolle Informationen über die Dynamik der Austauschprozesse von CO₂ zwischen Waldboden, Bestand und Atmosphäre.

Für die Messung stabiler Isotope des Kohlenstoffs (¹³C) und des Sauerstoffs (¹⁸O) im Feld existierten keine ausreichend schnellen Messinstrumente. Deshalb entwickelten Mitarbeiter der Abteilung Mikrometeorologie der Universität Bayreuth ein Mess-System auf der Grundlage der Relaxed-Eddy-Accumulation-Methode (REA-Methode). Umfangreiche Tests im Isotopenlabor des Max-Planck Institutes für Biogeochemie in Jena und der Feldeinsatz während des Experimentes WALDATEM-2003 zeigen, dass dieses System in der Lage ist, ¹³C- und ¹⁸O-Isotopenflüsse in bisher unerreichter Präzision zu bestimmen. Die Auflösung konnte mit den Entwicklungen um den Faktor 10 erhöht werden.

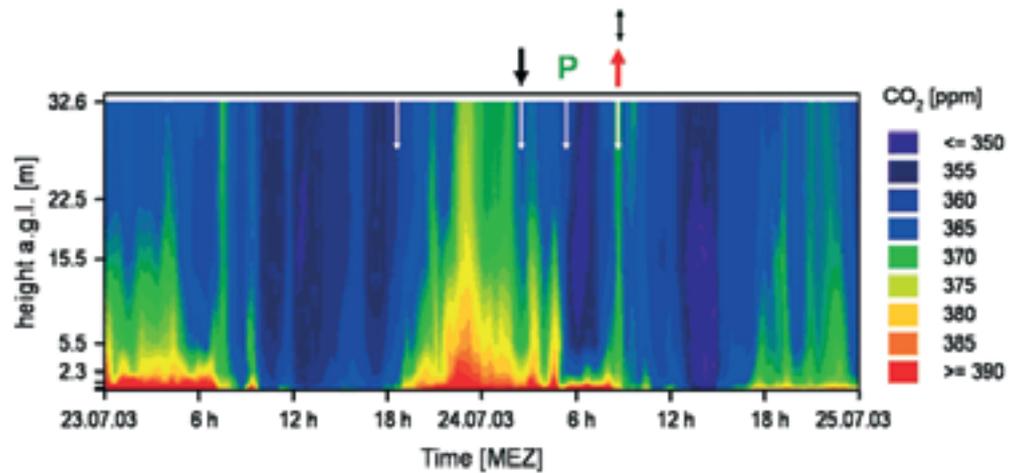
Mit dem neuen REA-Mess-System steht für die seit 1997 im Fichtelgebirge betriebene Messfläche Waldstein Weidenbrunnen (FLUXNET-Station DE-Wei des BayCEER) ein weiteres leistungsfähiges Mess-System zur Verfügung. Es ergänzt die bisher erfolgreich eingesetzte Eddy-Covariance-Methode, mit der zeitlich hoch auflösend (20 Hz) Luftbewegungen und Luftbeimengung gemessen werden, um die Kohlendioxidbilanz eines mitteleuropäischen Nadelwaldes zu bestimmen.

Das REA-Mess-System kam am Waldstein erstmals im Sommer 2003 während des Experimentes WALDATEM-2003 (WAVElet Detection and Atmospheric Turbulent Exchange Measurements) zum Einsatz. Die Ergebnisse der CO₂-Profilmessungen zeigen eine täglich wechselnde und, vor allem in den Morgenstunden, sehr spontane

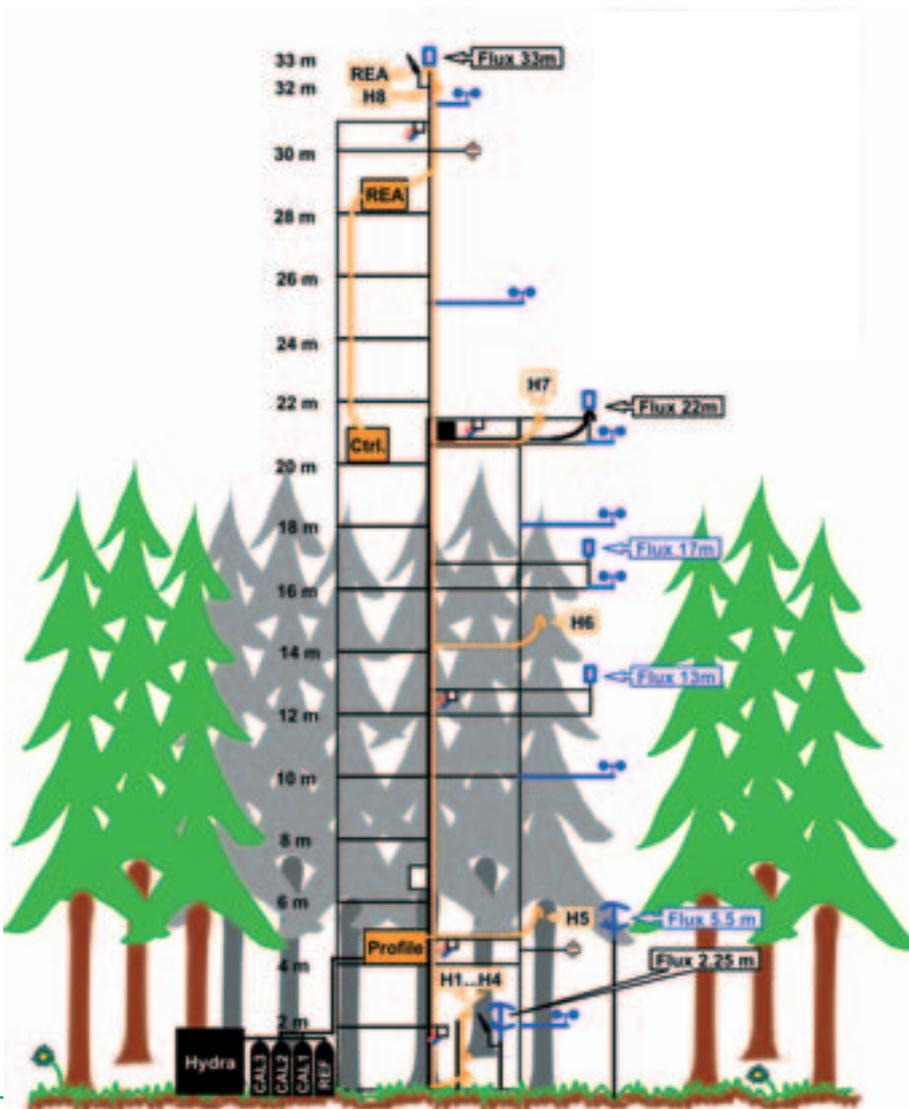


Dynamik des CO₂-Austausches.

Die Abbildung zeigt den chronologischen Verlauf der Vertikalprofile der CO₂-Konzentrationen am Messstandort Weidenbrunnen am 23. und 24. Juli 2003. Ab 18 Uhr (weißer Pfeil) reichert sich in der bodennahen Luftschicht CO₂ aus Atmungsprozessen der Pflanzen und Bodenorganismen an. Typischerweise wird durch einen kurzen Einbruch gegen 2:30 Uhr CO₂-arme, frische Luft in den Bestand von oben eingemischt. Mit Start der Photosyntheseleistung der Bäume ab 5:00 Uhr nimmt das CO₂ aus den Atmungsprozessen in der Kronenschicht ab. In der bodennahen Schicht verzögert sich diese Abnahme um drei Stunden. Erst gegen 8:30 Uhr wird das Atmungs-CO₂ durch einen plötzlichen Durchbruch aus dem Bestand gemischt. ■



Chronologische Vertikalprofile der CO₂-Konzentrationen in ppm am Mess-Standort Waldstein-Weidenbrunnen am 23. und 24. Juli 2003. Die weißen Pfeile markieren die im Text genannten Zeitpunkte, der abwärts gerichtete schwarze Pfeil markiert den Zeitpunkt eines nächtlichen Eintrages CO₂-armer, frischer Luft, der rote Pfeil den Zeitpunkt der morgendlichen Speicherentleerung unter gekoppelten (Doppelpfeil) Durchmischungsbedingungen. Das grüne P markiert den Zeitpunkt einsetzender Photosyntheseleistung der Waldpflanzen



Experimentanordnung am Messturm Waldstein/Weidenbrunnen während WALDATEM-2003. Die Kombination aus Flussmessungen und Profilmessungen für Wind, Temperatur, Wasserdampf und CO₂ erlaubt eine detaillierte Beobachtung der Austauschprozess in und über dem Bestand.

Johannes Ruppert
Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
Abteilung Mikrometeorologie
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Foken>

Blick unter den Boden

Die Verfügbarkeit und ausreichende Qualität von Wasser ist für viele ökologische Systeme von entscheidender Bedeutung. Ein großer Teil des in solchen Systemen verfügbaren Wassers bewegt sich im Untergrund als Grundwasser. Die Bewegung dieses Wassers zwischen dem Einsickern des Niederschlagswassers in der Boden bis zur Rückkehr des Grundwassers in ein Oberflächengewässer steht im Mittelpunkt hydrogeologischer Untersuchungen.

Eine direkte Beobachtung und Messung von Grundwasserströmung ist in der Regel nicht möglich, da das Wasser zum größten Teil in mikroskopischen Poren des Festgesteins oder des Lockersediments enthalten ist. Grundwasserbewegung wird daher im Gegensatz zur Strömung in Fließgewässern nur dort bewusst wahrgenommen, wo Grundwasser in spektakulärer Weise, beispielsweise an Karstquellen oder artesischen Brunnen, in Erscheinung tritt. Der unterirdische und dadurch nicht sichtbare Abfluss ist zwar wenig spektakulär, erreicht aber Größenordnungen, die mehr als 50 mal höher sind als der oberirdische Anteil in Oberflächengewässern.

Hydrogeologische Untersuchungen liefern wichtige Informationen über Herkunft und Chemismus des Grundwassers sowie lokale und weiträumige Strömungssysteme und bilden eine Grundlage für die nachhaltige Nutzung von Grundwasser. Während die Untersuchung der Grundwasserchemie in der Regel keine Probleme aufwirft (zumindest hinsichtlich Probenahme und Analytik), so ist die Bestimmung der

Grundwasserströmung nur unter beträchtlichen Schwierigkeiten möglich. Informationen zur Grundwasserströmung sind nur punktuell und durch indirekte Beobachtungen zu gewinnen. Eine Möglichkeit bilden Tracer-Experimente, bei denen Markierungsstoffe in das Grundwasser eingebracht werden und das Auftreten dieser Stoffe an definierten Messpunkten ermittelt wird.

Ein wesentliches Problem für die Bestimmung der Grundwasserströmung ist die Heterogenität des Aquifers, d.h. des durchströmten Gesteins oder Sediments. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Bestimmung der Aquiferheterogenität stellt die geologische Untersuchung und Interpretation des Aquifers dar. Wichtige hydrogeologische Parameter wie Porosität, hydraulische Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient, sind zwar meist heterogen im Untergrund verteilt, orientieren sich jedoch an der Geometrie und dem strukturellen inneren Aufbau des Gesteins- oder Sedimentkörpers. Dieser Aufbau ist aus der Entstehungsgeschichte des Gesteins- oder Sedimentkörpers heraus verständlich. Er kann als Modell für die Verteilung hydrogeologischer Parameter, gewissermaßen als „proxy“, verwendet werden kann.

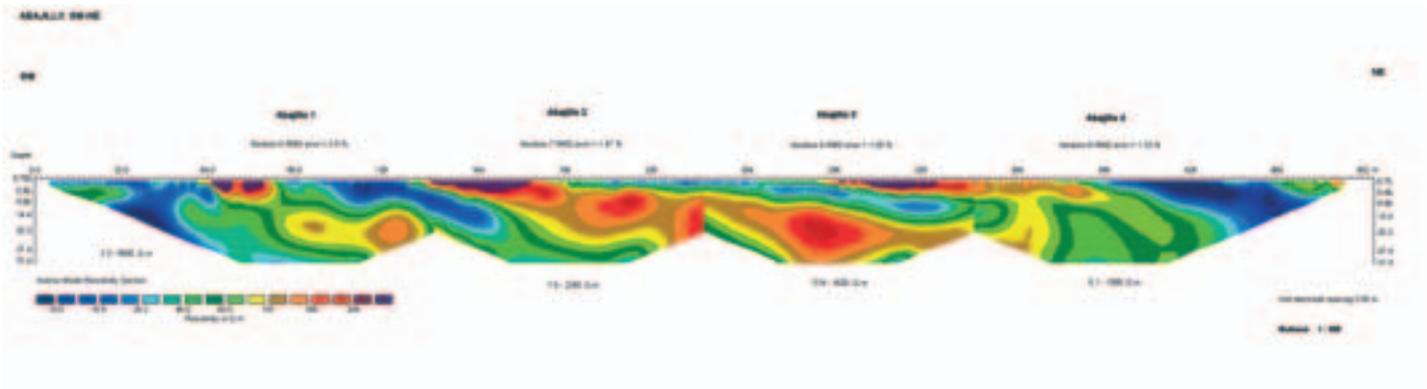
Geometrie und struktureller innerer Aufbau eines Gesteins- oder Sedimentkörpers sind freilich nur an wenigen Punkten einer direkten Beobachtung zugänglich, etwa in Kiesgruben, Straßenböschungen oder Steinbrüchen. Solche punktuellen, unvollständigen Informationen können jedoch zu einer vollständigeren Information erweitert

werden, indem versucht wird, die Genese des Aquifers zu verstehen und durch Vergleiche mit bekannten oder rezenten Gesteinskörpern auf das Ausmaß an Heterogenität rückzuschließen. Findet man beispielsweise Bruchstücke von Riffbildnern im Kalkstein, so liegt es nahe, auf die Existenz eines nahegelegenen Riffs zu schließen (mit meist erhöhter Porosität und günstigen Bedingungen für Grundwasserströmung).

Auch diesem auf Analogieschlüssen und Faziesinterpretation beruhenden Ansatz sind jedoch Grenzen gesetzt, da in humiden Bereichen der geologische Aufbau zumeist unter Boden und Vegetation verdeckt ist oder der betreffende geologische Körper an der Oberfläche nicht ansteht.

Hier ist der Einsatz geophysikalischer Methoden eine günstige Alternative zur kostenintensiven und nur punktuellen Informationsgewinnung mittels Bohrungen. Oberflächennahe Geophysik erlaubt in vielen Fällen einen Blick in und unter den Boden. Neben der bereits seit vielen Jahrzehnten bewährten Hammerschlagseismik wurden in den vergangenen Jahren zunehmend Methoden entwickelt, bei denen die elektrischen Eigenschaften der Gesteine und Sedimente gemessen und abgebildet werden. Zwei dieser neuen Methoden, tomographische Geoelektrik und Georadar, werden in der Abteilung Geologie für die hydrogeologische Erkundung eingesetzt.

In einem Projekt zur Grundwassererkundung in einem Wassermangelgebiet in der Mancha (Spanien) musste aufgrund unzureichender



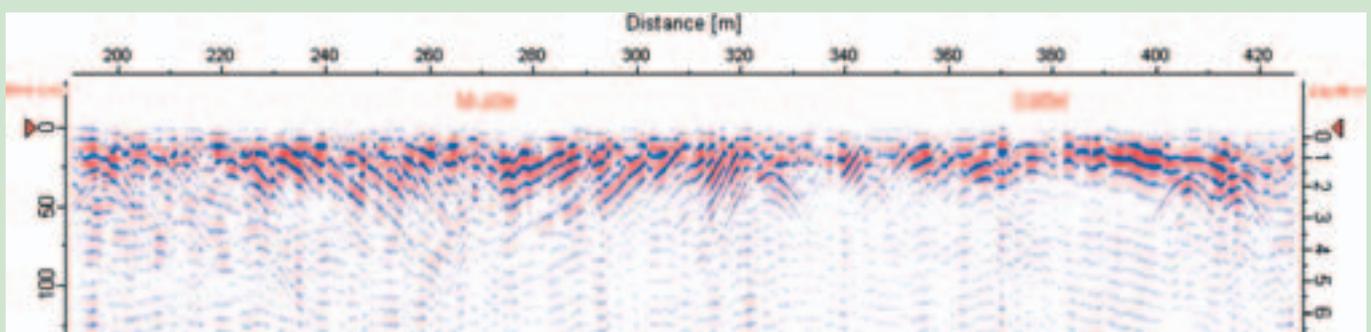
geologischer Aufschlüsse auf die Methode der tomographischen Geoelektrik zurückgegriffen werden. Bei dieser geophysikalischen Methode werden zahlreiche Elektroden entlang einer Profillinie in den Boden eingebracht. Anschließend wird rechnergesteuert systematisch zwischen unterschiedlichen Elektrodenpaaren der scheinbare elektrische Widerstand gemessen. Mittels eines mathematischen In-

versionsmodelles wird daraus eine Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes berechnet, die in vielen Fällen eine wirklichkeitsnahe Abbildung der geologischen Verhältnisse darstellt. Auf dem Messprofil konnten so sandige Einheiten (rot) von tonigen (blau) unterschieden werden und die Lagerungsverhältnisse der Schichten (flaches Einfallen nach rechts) geklärt werden. Die Bestimmung

einer für eine Grundwassernutzung geeigneten Schicht und zweier Bohransatzpunkte beruhte auf dieser Untersuchung. Beide Grundwasserbohrungen waren erfolgreich. ■

[Prof. Dr. Klaus Bitzer, Abteilung Geologie
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/Bitzer>]

Georadar



Tomographische Geoelektrik ist ein in solchen Fällen erfolgreich, wo das Erdreich ausreichend durchfeuchtet ist, um elektrischen Strom leiten zu können. Für trockene Klimate ist dagegen das Georadar ein geeignetes Verfahren, da Radarwellen vor allem dann gut in den Boden eindringen, wenn u.a. die Bodenfeuchte gering ist. Die geologische Struktur, wie in diesem Beispiel die Faltung der Schichten in eine Mulde und einen Sattel, sowie die Lage des Grundwasserspiegels kann oft aus solchen Messungen ermittelt werden.

Perspektiven hydrologischer Forschung und Lehre

an der Universität Bayreuth



Seit dem 1. September 2003 vertrete ich das Fach Hydrologie an der Universität Bayreuth als Nachfolger von Professor Herrmann. Man kann einen Beitrag über die Perspektiven hydrologischer Forschung und Lehre an der Universität Bayreuth nicht formulieren, ohne auch an das durch Professor Herrmann Geschaffene anzuknüpfen.

Es war das große Verdienst Professor Herrmanns, am Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Bay-

reuth bereits in den 70-er und frühen 80-er Jahren mit der Frage nach dem Verhalten von Umweltchemikalien in der Hydrosphäre eine in Deutschland neue Fachrichtung der hydrologischen Wissenschaften einzuführen. Er bewies den Mut, mit Dr. Frevert einen rigorosen Vertreter der physikalischen Chemie als Assistenten für das Gebiet „Hydrochemie“ einzustellen. Damit öffnete er seinen Lehrstuhl den Konzepten von Professor Stumm, dem Nestor der Aquatischen Chemie und Autor des Klassikers „Aquatic Chemistry“. Diese inhaltliche Ausrichtung war sicherlich eine Grundlage für den Erfolg der Bayreuther Geoökologie mit ihrem auf stoffliche Aspekte ausgerichteten Schwerpunkt.

Es ist vor allem diese Tradition der stofflich orientierten Hydrologie, der ich mich verpflichtet fühle. Mein wissenschaftlicher Werdegang ist geprägt durch Forschungen, die der Aufklärung hydrogeochemischer Prozesse in aquatischen Systemen dienen. Geboren im Jahre 1958 und aufgewachsen im mittelfränkischen Gunzenhausen wählte ich, dem Zeitgeist des Jahres 1979 am Beginn der Umweltbewegung folgend, das Studium der Geoökologie in Bayreuth. Nach der Diplomarbeit am Kinneret Limnological Laboratory in Israel, der Promotion an

der Universität Bayreuth und einem Post-Doc-Aufenthalt am Seenforschungsinstitut der EAWAG/ETH-Zürich in Kastanienbaum/Schweiz übernahm ich von 1991 bis 2001 die Leitung der Limnologischen Station der Universität Bayreuth.

Diese Tätigkeit wurde unterbrochen von einem Forschungsaufenthalt an der Colorado School of Mines in Golden, USA. Der inhaltliche Schwerpunkt dieser Jahre lag in der Frage nach der Kopplung geochemischer und mikrobiologischer Prozesse in aquatischen Systemen. Dieser wissenschaftliche Akzent, inzwischen mit Fragestellungen, die dem geowissenschaftlichen Bereich entstammen (Bergbaufolgen, Altlasten), war es wohl, der 2001 zu einem Ruf an die RWTH Aachen auf eine Professur für Hydrogeologie führte.

Sowohl die reine Forschungsuniversität Bayreuth als auch die technische Universität mit ihrem Prag-



Schnitt durch einen mit arsen- und chromhaltigen Holzimprägniermittel kontaminierten Boden.

Deutlich sichtbar ist die massive Kontamination insbesondere in den oberen 6 cm (dunkle Färbung). Der Boden hatte ursprünglich die helle Farbe, die am unteren Rand des Bildes noch erkennbar ist.

matismus und ihrer Praxisbezogenheit prägten ganz entscheidend meine Position als Wissenschaftler und akademischer Lehrer: Ohne naturwissenschaftliche Grundlagen und grundlagenorientierte Forschung können Lösungsansätze für Fragen aus der Praxis nicht entwickelt werden. Mit letzteren wurde ich in Aachen in einer Vielzahl konfrontiert, wie ich dies in Bayreuth nie erlebt hatte.

Diese Erkenntnis möchte ich in Bayreuth umsetzen durch ein offenes Ohr insbesondere für die Wasserwirtschaft, mit der ich als Ansprechpartner aus der Wissenschaft kooperieren möchte. Ich sehe in der geplanten Verlagerung von Abteilungen des Landesamtes für Wasserwirtschaft nach Hof eine große Chance für den Wissenstransfer, verbindet mich doch eine langjährige Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Grundwasserschutzes mit dieser Behörde. Nicht zuletzt erwarte ich auch einen erheblichen Impetus für die Studierenden der Bayreuther Geoökologie, wenn angewandte Fragen aufgegriffen werden und in die Lehre integriert werden.

Ein wichtiges Thema der Hydro- und Biogeochemie ist weiterhin die Frage nach Verbleib und Verhalten von Schadstoffen in der Hydrosphäre. Mit Dr. Christian Blodau, dem Leiter der Limnologischen Station, der von der McGill University (Montreal) zum Lehrstuhl gestoßen ist, und Dr. Michael Radke, einem Absolventen von Professor Herrmann, arbeiten seit Beginn meiner Tätigkeit zwei Nachwuchswissenschaftler am Lehrstuhl, die diese Richtung motiviert und engagiert verfolgen.

In unseren Untersuchungen haben wir gezeigt, dass viele hydrogeochemische Prozesse durch die physikalischen Randbedingungen, sprich das hydraulische Umfeld, geprägt sind. So stellen sich zum Beispiel in Sedimenten schwefelsaurer Tagebau-Restseen (pH 2,5 - 3) Ostdeutschlands immer dann Sulfat



Studenten bei der Ansprache und Schneiden eines Sedimentkerns aus dem Altmühlsee

reduzierende, Säure neutralisierende Bedingungen ein, wenn der Zustrom von schwach saurem (pH ~ 5) anaeroben Grundwasser hoch ist. Ist dies nicht der Fall, zeigen die - weiterhin anaeroben - Sedimente das gleiche chemische Milieu wie der See selbst, Sulfat scheint unter diesen Bedingungen nicht reduziert zu werden. Ganz offensichtlich steuert der Zustrom die Prozesse im Sediment unter Ausbildung einer hochgradig komplexen biogeochemischen Struktur.

Die Konsequenzen etwa für Fragen der Sanierung sind evident. Ähnliche, durch die physikalischen Randbedingungen kontrollierte Strukturen können wir in kontaminierten Grundwasserleitern beobachten.

Es ist diese Kopplung zwischen hydraulischen Bedingungen und biogeochemischen Prozessen, die mich hochgradig fasziniert und die ich zum Schwerpunkt hydrologischer Forschung an der Universität Bayreuth machen möchte.

Zu Grunde liegen hierbei Konzepte, wie sie etwa aus der chemischen Reaktionstechnik bekannt sind. Sie müssen allerdings für Systeme, deren physikalische Eigenschaften durch die Geologie oder die Boden-genese bestimmt werden, modifiziert werden. Dies geht nur durch eine entsprechende modellhafte Abstraktion des Problems. Für diese

Um das Austragsverhalten von Schadstoffen in das Grundwasser zu bestimmen, wird ein Bodenmonolith entnommen. An dem Standort sind über 70 Jahre chrom- und arsenhaltige Holz imprägniermittel in den Boden eingesickert.



Aufgabe konnte ich Dr. Jan Fleckenstein gewinnen, der in diesem Jahr am renommierten Department of Land, Air and Water Resources der University of California in Davis im Fach Hydrological Sciences promoviert hat. Verstärkt wird unser wissenschaftliches Team durch Professor Dr. Jha, einem Humboldtstipendiaten vom Indian Institute for Technology in Kharagpur, der zu Fragen der künstlichen Grundwasseranreicherung arbeitet.

Da die genannten Forschungsthemen in der Regel an den Schnittstellen zwischen Disziplinen liegen, sind Kooperationen mit anderen Instituten unabdingbar. Dabei handelt es sich vor allem um die Bodenwissenschaften, aber auch die Mikrobiologie. Mit großem Interesse verfolge ich auch die jüngsten Entwicklungen an der Universität Bayreuth, wie etwa die Gründung der Bayreuther Zentrums für Kolloide und Grenzflächen. Beide Aspekte spielen in der Hydrosphäre (Mineral-Lösungs-Wechselwirkungen, insbesondere von Nanoteilchen, Biomineralisation!) eine prominente Rolle.

Als Verfechter der Humboldtschen Einheit von Forschung und Lehre werde ich den oben skizzierten Forschungsschwerpunkt maßgeblich in



die Ausbildung in der Hydrologie einfließen lassen. Viele der aktuellen Themen aus dem angewandten Bereich der stofflichen Hydrologie wie etwa „Natural Attenuation“ oder „Sickerwasserprognose“ können nur mit einem soliden Prozessverständnis bearbeitet werden. Auch die Fragen der Wasserwirtschaft werden immer komplexer und sollen in der Lehre aufgegriffen werden.

Neben einer soliden Ausbildung in den chemischen und physikalischen Grundlagen der Hydrologie werden daher im Hauptstudium Kenntnisse in der Analyse aquatischer Sys-

teme vermittelt, die in Übung und Projektseminar vertieft werden. Die Themen rekrutieren sich aus der Praxis. In diesem Sommer haben wir beispielsweise die wasserwirtschaftliche Frage bearbeitet, wie sich die Überleitung nährstoffreichen Wassers aus einem Stausee (dem Altmühlsee) auf die Gewässergüte eines dahinter geschalteten Stausees auswirkt.

In den vergangenen Jahren hat sich die Universität Bayreuth zu einem echten Zentrum für die Hydrologischen Wissenschaften entwickelt, wie es in Deutschland nicht häufig zu finden ist. Das hydrologische Geschehen im Untergrund vertritt Professor Bitzer, die hydrologischen Prozesse in der ungesättigten Zone im Boden bearbeitet Professor Huwe und Wasseraustausch-Prozesse an der Grenzfläche Boden-Vegetation-Atmosphäre sind Schwerpunkt von Professor Foken. Es ist mir ein großes Anliegen, diese Expertise um den Aspekt der qualitativen Hydrologie zu bereichern und damit den Standort Bayreuth als ein Zentrum der Umweltforschung zu stärken. ■

Studierende bei der Ausfahrt zur Probenahme auf den Kleinen Brobachsee



Professor Dr. Stefan Peiffer
Lehrstuhl Hydrologie
Gebäude Geo II, Zimmer 1.22
Tel. 0921/55-2251
E-Mail: s.peiffer@uni-bayreuth.de
www.hydro.uni-bayreuth.de

Neuer superharter Halbleiter aus Verbundstoff hergestellt

Materialforschern am Bayerischen Geoinstitut der Universität Bayreuth ist zusammen mit Kollegen der Universität Paris-Nord die Herstellung eines neuen superharten Verbundstoffes aus Bor-Karbid und Borhaltigem Diamant gelungen. Zur Synthese des neuartigen Stoffes unter sehr hohen Drücken und Temperaturen (200 kbar und über 2000 Grad Celsius) wurde von den Bayreuther Wissenschaftlern Dr. Natalia Dubrovinskaia und Dr. Leonid Dubrovinsky (beide im Bild rechts) die in Europa einzigartige 5000-Tonnen-Vielstempel-Presse des Bayerischen Geoinstituts eingesetzt. Das viel versprechende Verbundmaterial besitzt eine extreme Härte wie Diamant und wird für neue technische Anwendungen in der Mikroelektronik von besonderem Interesse sein. Über die Ergebnisse ihrer erfolgreichen Experimente berichten die Forscher in der international renommierten Fachzeitschriften Applied Physics Letters und Nature Materials.

Bisher werden Diamanten wegen ihrer einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften für verschiedene technologische und experimentelle Anwendungen eingesetzt. Diamant wird besonders wegen seiner großen Härte, seiner hohen thermischen Leitfähigkeit, seiner hohen Elektronen- und Leerstellen-Mobilität im Kristallgitter und seiner Resistenz gegenüber chemischen Reaktionen geschätzt. Auf dem Gebiet der Elektrotechnik/Elektronik steigt die Nachfrage nach Diamanten und diamantähnlicher Materie ständig. Zwar werden Materialien auf Diamantbasis in absehbarer Zeit Silizium

in der Mikroelektronik nicht verdrängen, jedoch ermöglichen mikroelektronische Bauteile auf Diamantbasis den Einsatz unter extremeren Bedingungen (zum Beispiel in erheblich höheren Temperaturbereichen) als entsprechende Chips aus Silizium.

Reiner Diamant stellt einen perfekten Isolator für elektrischen Strom dar. Aber wie Silizium kann Diamant durch Spuren von Bor oder Stickstoff im Kristallgitter zum Halbleiter werden. Aufgrund seiner Eigenschaften ist jedoch die künstliche „Verunreinigung“ von Diamant wie auch seine mechanische oder elektrochemische Bearbeitung sehr problematisch.

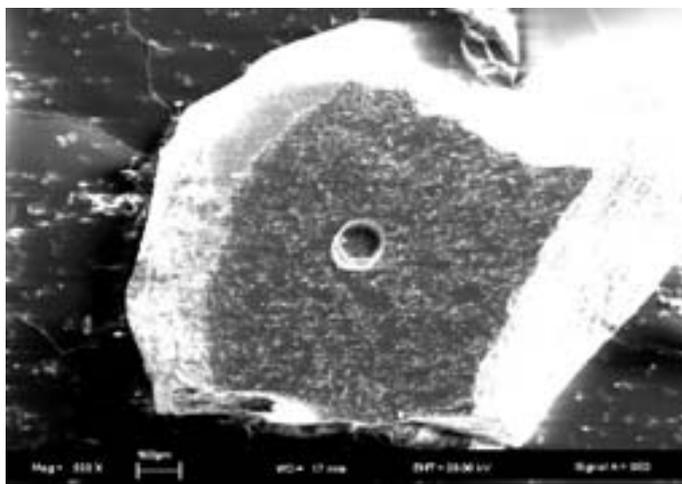
Diese Nachteile gleicht das neue Bor/Kohlenstoff-Verbundmaterial aus. Die Bayreuther Ergebnisse zeigen, dass Materie mit einer Diamant entsprechenden Härte nicht ausschließlich monomineralisch, d.h. aus einem einzigen Mineral, aufgebaut sein muss. Aufgrund seiner Halbleitereigenschaften lässt sich das neue Material trotz seiner großen Härte präzise bearbeiten (Erodieren, Formen, Polieren – siehe Foto), sodass es in der Hochleistungs- und Hochfrequenz-Elektronik und dort, wo sehr exakt geformte Feinwerkzeuge gefordert sind, Einsatzgebiete finden wird. Innovative Entwicklungen bei der Herstellung neuer harter und ultraharter Materie im Labor erfordern neue Techniken und Methoden zur Bestimmung der Härte der unterschiedlichen Materialien. Neue Verbundstoffe und Materialien, die härter als Diamant sind, lassen sich mit den bestehenden Härteskalen, die auf relativen Härtegraden beruhen,



nicht mehr charakterisieren. Das bekannteste Beispiel für die bisherige Einstufung ist die Mohs'sche Härteskala mit dem Diamant (Härte 10) am oberen Skalenende.

Jetzt hat eine Gruppe Wissenschaftler, zu denen auch Frau Dr. Dubrovinskaia gehört, im Rahmen eines internationalen Arbeitstreffens neue, komplexere Methoden für eine moderne Härtebestimmung erarbeitet und vorgestellt, die auch die neuen Verbundwerkstoffe erfasst und auch für Härtegrade angewendet werden kann, die oberhalb der Diamanthärte liegen. ■

Die Halbleitereigenschaften des neuen superharten Bor-Kohlenstoff-Verbundstoffes ermöglichen die sehr präzise Erodierung eines Loches mit einem Durchmesser von ~80 µm (0,08 mm) in dem Material mit Diamant-ähnlicher Härte.



Bayreuth: Ein Meilenstein Weiterentwicklung

Seit dem 1. Oktober verfügt die Universität Bayreuth nun über ein weiteres „Haus für Spitzenforschung“ das gleichzeitig Anlaufstelle für die Wirtschaft für Kooperationsprojekte ist: Mit einem Festakt ist nämlich am 1. Oktober das neue Laborgebäude des BZKG (Bayreuther Zentrum für Kolloide und Grenzflächen) und BioMedTec, Laboratorium für Wirkstoffforschung, eingeweiht worden.

Mit Komplimenten überschüttete Bayerns Umweltminister Dr. Werner Schnappauf bei der Einweihung des Gebäudekomplexes die Universität und bezeichnete sie als „erfolgreichste Neugründung im Freistaat“, die in einem „furiösen Sturmlauf“ mit dem BZKG und dem BioMedTec-Komplex einen „Meilenstein bei der Weiterentwicklung ihres Forschungsprofils markiert“ habe. Der Minister erinnerte in diesem Zusammenhang daran, dass die Bayreuther Universität mit drei von insgesamt 15 Projekten im Bayerischen Elitenetzwerk vertreten sei, von denen der Elitestudiengang „Macromolecular Science“ gerade seine Arbeit aufgenommen habe.

Mit ihrem langjährigen Konzept der Profilbildung durch Forschungsschwerpunkte bilde die Universität einen „Transmissionsriemen zur Wirtschaft“, unterstrich der Minister. Es sei notwendig, sagte Schnappauf weiter, diesen Prozeß weiter voranzutreiben, denn es gelte, neue Erkenntnisse aus der

Wissenschaft schnellstmöglich in Anwendungen und Produkte umzusetzen. Er sage voraus, dass das weiter konturierten Forschungsprofil der Universität von herausragender Bedeutung sein und „in Oberfranken einen Schritt in die Zukunft“ darstellen werde. Die Ansammlung wissenschaftlicher Kompetenz an der Universität bilde eine Grundlage dafür, dass es gelingen könnte, in Bayreuth eine Großforschungseinrichtung anzusiedeln. „Ich sehe auf der Basis der Kompetenzansammlung eine Chance dafür, sagte der Minister und kündigte aus dem Konzept der Staatsregierung mit den Handlungssträngen „sparen, reformieren, investieren“ die Investition von 300 Mio. € aus weiteren Privatisierungserlösen an, „um Bildung und Infrastruktur“ zu unterstützen.

Aus Privatisierungserlösen, nämlich aus der High-Tech-Offensive des Freistaates stammen auch die 2,8 Mio. Baukosten für den neuen, in 15 Monaten errichteten Gebäudekomplex, wobei der Leiter des Staat-

lichen Hochbauamtes in Bayreuth, Fritz Angerer, nicht ohne stolz darauf hinwies, dass der Kostenrahmen unterschritten werden konnte, und die Einsparungen in Bayreuth blieben und für die Ausstattung des Gebäudes eingesetzt wurden.

Universitätspräsident Professor Dr. Dr. h.c. Helmut Ruppert („Wir haben dringend auf dieses Gebäude gewartet“) hatte eingangs bei seiner Begrüßung darauf hingewiesen, dass die beiden in dem Gebäude vereinigten Schwerpunkte durch die Kooperation mit der Wirtschaft „sehr stark gewachsen“ seien und deswegen die Räumlichkeiten für die hier betriebene Drittmittelforschung nicht mehr ausgereicht hätten. Das neue Gebäude sei aber nicht nur aus der Sicht der Forschung notwendig, sondern habe auch positive Wirkung für den Bereich des Hauptstudiums und dem Querverweis zu dem Elitestudienprogramm.

Der Präsident bekräftigte erneut, dass die Universität auf der Grundlage



bei der des Forschungsprofils

„bewußter und langjähriger Schwerpunktsetzung“ bereit sei, mit der Wirtschaft zu kooperieren. Seine Universität sei „innovationswillig“, betonte Professor Ruppert, und wolle zusammen mit der Wirtschaft „problembewußt Lösungen erarbeiten“. Das Bayreuther Zentrum für Kolloide und Grenzflächen wurde im Jahr 2000 als zentrale Einrichtung der Universität Bayreuth gegründet. Es dient der Intensivierung der Zusammenarbeit mit der regionalen und überregionalen Industrie bei der Bearbeitung kolloidaler Systeme. Zentrale Aufgaben des Zentrums sind:

- Die Bündelung und Stärkung des Kolloid- und Grenzflächenforschung, ausgehend von der Grundlagenforschung über die angewandte Forschung bis hin zur industriellen Anwendung,
- die Nutzbarmachung der vorhandenen Kompetenzen sowie der experimentellen Infrastruktur an der Universität Bayreuth für interessierte Industrieunternehmen,

- die Hilfestellung bei der Problemlösung und Optimierung industrieller Prozesse.

Das BZKG baut auf bestehende Kompetenzen mehrerer Lehrstühle verschiedener Fakultäten auf, bündelt diese und führt somit zu einer merklichen Stärkung der Gesamtkompetenz. Das neue Laborgebäude verfügt über ein breites Spektrum an unterschiedlichen Geräten und soll damit die Zusammenarbeit und der Kontakt mit Industrieunternehmen gewährleisten.

Neue Wirkstoffe und bioanalytische Verfahren sind die Voraussetzung für Innovationen in Gesundheitswesen, pharmazeutischer Industrie, Umweltmanagement und Lebensmittel-industrie. BioMedTec ist ein Verbund der Universitäten Bayreuth, Erlangen-Nürnberg und Würzburg auf dem Gebiet der Biomedizin. Die Arbeitsgruppen der Universität Bayreuth sind im Rahmen dieses Vorhabens in den Bereichen biochemische Analytik, Enzymologie und Strukturfor-schung tätig. Das Ziel des neuen Laboratorium für Wirkstofffor-schung ist die Entwicklung an-wendungsorientierter Konzepte von der molekularen Grundlagenfor-schung bis zum Design neuer Wirk-stoffe. Es soll Forschern und Studenten im Bereich der Lebens-

wissenschaften die Möglichkeit bieten, unter Nutzung von Synergismen der unterschiedlichen Arbeitsgebiete und in Partnerschaft mit der Industrie moderne praktische Lösungen zu suchen. ■

BZKG

Aktuelle Informationen unter
www.bzkg.de
oder bei Frau Christine Thunig,
Geschäftsstelle des BZKG,
Tel: 0921/55-4373.

BioMedTech

Kontakt:

Prof. Dr. Mathias. Sprinzl
Proteindesign, biochemische Analytik
und Biochips
Tel. 0921/55-2420,
E-Mail: mathias.sprinzl@uni-bayreuth.de

Prof. Dr. Gerhard Krauss
Enzyme für die Lebensmittelindustrie
Tel. 0921/55-2428 oder – 3668,
E-Mail: gerhard.krauss@uni-bayreuth.de

Prof. Dr. Paul Rösch
Wirkstoffe gegen Amyloidosen
Tel. 0921/55-3540,
E-Mail: paul.roesch@uni-bayreuth.de

Junior-Prof. Dr. Holger Dobbek
Von der Struktur über die Funktion
zum Wirkstoff
Tel. 0921/55-2408,
E-Mail: holger.dobbek@uni-bayreuth.de



25 Jahre Emil-Warburg-Stiftung für Eine Erfolgsgeschichte

Die verschiedenen Forschungsbereiche der Universität Bayreuth haben schon frühzeitig den Dialog zwischen den Fachwissenschaften und der Gesellschaft gesucht, in unterschiedlicher Weise geführt und intensiv gepflegt. Eine der ersten Stiftungen für die Universität Bayreuth hatte und hat die Förderung der Forschung im Fach Physik zum Ziel. Sie wurde am 26.11.1978 – dem 3. Jahrestag seit der Eröffnung der Universität Bayreuth – zum Gedächtnis an Prof. Dr. Emil Warburg errichtet.

In der Erkenntnis, dass private Initiativen zur Unterstützung der Forschung wichtig sind, haben seine Enkel Dr. Peter G. Meyer-Viol und Dr. Jan Hendrik Deurvorst schon im Jahre 1977 über eine namhafte Förderung der Physikforschung nachgedacht. Die Generation der Enkel von Emil Warburg wollte hier ein Zeichen setzen, und so stifteten sie das Grundkapital für die Emil-Warburg-Stiftung.

Neben den Spenden aus den Familien Meyer-Viol, Deurvorst sowie Bon-Meyer konnten durch Initiative des damaligen Oberbürgermeisters Hans Walter Wild neben der Stadt Bayreuth die damalige BELG (jetzt E.ON AG), die BAT-Cigarettenfabrik GmbH (jetzt British American Tobacco Germany GmbH) und die Sparkasse Bayreuth für eine Beteiligung gewonnen werden. Im Dezember 1979 beteiligte sich die Firma Siemens AG mit einem namhaften Betrag an der Stiftung. Später kamen dann noch von den genannten Institutionen und Familien weitere Spenden hinzu. Vorbildlich ist auch hier zu erwähnen, dass einer der Mitglieder des Physikalischen Instituts, Professor Dr. Friedrich Busse, diese Stiftung ebenfalls

durch eine Spende unterstützt hat. Inzwischen ist das Stiftungsvermögen laut Protokoll der letzten Sitzung der Stiftung im Mai dieses Jahres auf rund 585.700 Euro angewachsen. Die Stiftung wurde im Jahr 1979 rechtsfähig. Der Stiftungszweck ist in der Satzung festgelegt und dort heißt es:

Die Stiftung

- *fördert Forschungsvorhaben der Universität auf dem Gebiet der Physik durch Ausreichung finanzieller Mittel*
- *zeichnet besondere Leistungen aus dem Fach Physik der Universität aus*
- *bewahrt das Gedächtnis an Prof. Dr. Emil Warburg, erhält und pflegt dessen letzte Ruhestätte im Stadtfriedhof Bayreuth*

Bevor nun auf die außerordentlich erfolgreiche Unterstützung der Forschung der Physik eingegangen wird, seien noch einige Daten zum Namensgeber der Stiftung nachgereicht. Emil Warburg wurde 1846 in Altona geboren und er ist 1931 in Bayreuth verstorben. Er war ein außerordentlich erfolgreicher Forscher und seine berufliche Laufbahn als Professor für Physik führte ihn an die Universitäten Straßburg, Freiburg und Berlin. 1905 wurde er Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin, einer Vorgängerin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig, mit deren Präsidenten die Stiftung und die Physik in Bayreuth enge Kontakte pflegen. Vor dieser Tätigkeit war er außerdem Präsident der Deut-

schen Physikalischen Gesellschaft, und zwar von 1899 bis 1905.

Die Hauptarbeitsgebiete von Emil Warburg waren die Untersuchungen von Schwingungen und ihren Dämpfungen, das Verhalten von Wasser an den verschiedenen Oberflächen, die Klärung der theoretischen Vorstellung zur kinetischen Gastheorie und insbesondere auch die Beschreibung des Magnetismus, wobei er insbesondere die uns heute geläufige sogenannte Hysteresekurve untersuchte und deutete.

Zur 150. Wiederkehr seines Geburtstags im Jahre 1996 fand an der Universität Bayreuth ein großes Kolloquium statt, bei dem der Festvortrag von dem Nobelpreisträger für Physik, Herrn Prof. Klaus von Klitzing zum Thema „Die Wissenschaft des Messens“ gehalten wurde; ein Thema, das heute zu den Hauptarbeitsgebieten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt gehört, von dem wir im Physikalischen Kolloquium im Jahre 2005 von seinem Präsidenten, Professor Dr. Ernst Otto Göbel, einen weiteren Vortrag hören werden.

Auf der genannten Veranstaltung im Jahre 1996 hat Professor Dr. Jürgen Kalus einen Vortrag zum Leben Emil Warburgs gehalten und viele Einzelheiten zusammengetragen. Aber ein wichtiger Punkt sei hier herausgegriffen. Zum Arbeitsstil von Emil Warburg heißt es: „Er zeichnet sich durch das innige, heute nicht eben häufige Zusammenwirken experimenteller Geschicklichkeit und durch einen besonnenen theoretischen Durchblick aus“.

die Physik der Universität Bayreuth

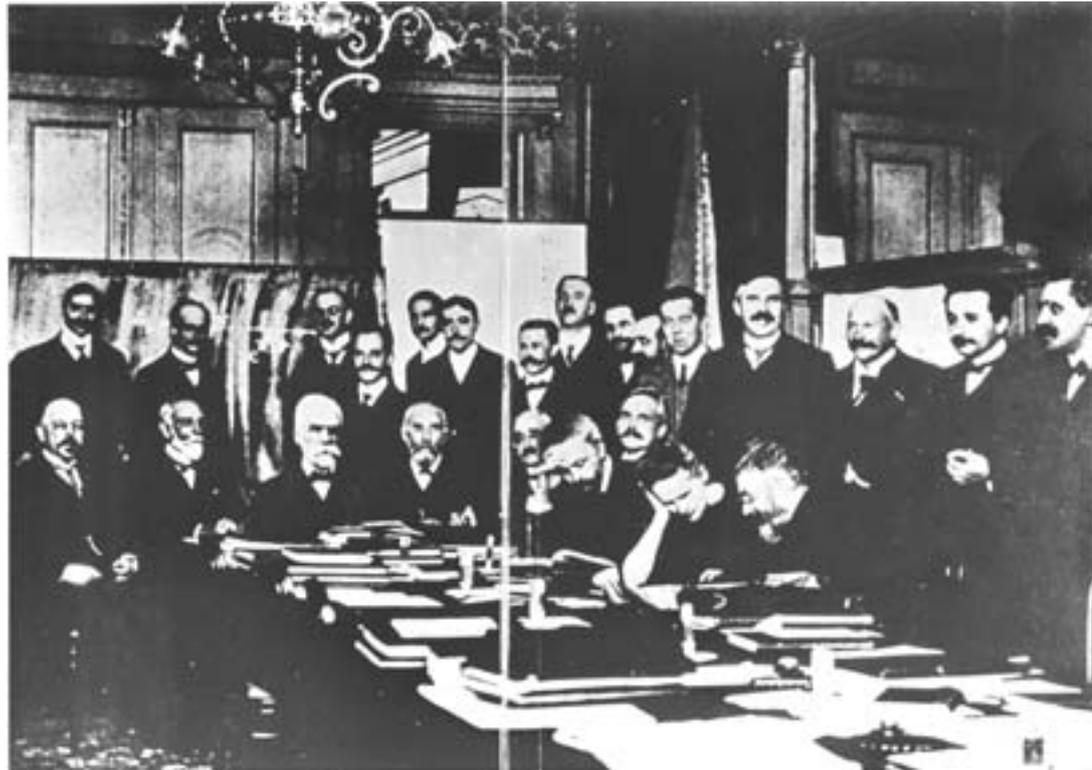
Prof. Dr. Helmut Büttner
Oberbürgermeister Dr. Dieter Mronz

Die Erfolge

In den 25 Jahren ihres Bestehens hat die Stiftung bis zum 18.10.2004 etwa 942.000 Euro in wichtige Projekte der Universität in Bayreuth investiert. Dieses ist inzwischen fast das Doppelte des Stiftungsvermögens und schon diese Zahl zeigt, dass zwar absolut gesehen und verglichen zu anderen Drittmittelgebern hier keine Förderung von Großgeräten – die zum Teil allein diese Summe verschlingen würden – möglich ist, dass aber die etwa 36.000 Euro pro Jahr an vielen Stellen, insbesondere auch zur Förderung des Nachwuchses sehr effektiv eingesetzt werden können. Im Einzelnen entscheidet der Stiftungsvorstand¹ aufgrund der Anträge des Physikalischen Instituts. Er trifft eine Auswahl der beantragten Projekte und es gibt im Wesentlichen sechs verschiedene Förderungsbereiche, die im Einzelnen nachfolgend aufgeführt werden und wie folgt gefördert wurden:

1. Geräte für		
Forschungszwecke	618.000 €	66 %
2. Symposien	120.000 €	12,5 %
3. Forschungskurz-		
aufenthalte	81.000 €	9 %
4. Verleihung von Preisen	45.000 €	5 %
5. Forschungskolloquien	36.000 €	4 %
6. Seminare sowie andere		
Veranstaltungen der		
Theoretischen Physik	28.000 €	2 %
7. Grabpflege	4.600 €	0,5 %
8. Verwaltungskosten	9.400 €	1 %
Gesamt	942.000 €	100 %

Diese einfachen Zahlen sollen noch kurz kommentiert werden, damit man sehen kann, wie nützlich diese



Der erste Solvay Kongress, 1911. Es handelt sich um eine einzigartige Aufnahme, die im Hotel Metropole in Brüssel entstand und die damalige Crème der europäischen Physiker zeigt.

Sitzend von links: Nernst, Brillouin, Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wien, Madame Curie, Poincaré.
Stehend von links: Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, de Broglie, Knudsen, Hasenöhrl, Hostenlet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerlingh, Onnes, Einstein, Langevin.
(Institut International de Physique, Solvay)

Mittel im Laufe der Jahre eingesetzt werden konnten. Da sind z. B. die Geräte für Forschungszwecke. Hier handelt es sich im Allgemeinen um Geräte, die Zusatzinvestitionen für große Forschungs-

vorhaben sind, die z. B. durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft oder andere Institutionen gefördert werden. Hier hat

das Physikalische Institut in der Vergangenheit insbesondere auch jüngere Nachwuchswissenschaftler unterstützt und inzwischen findet sich in fast jedem Labor ein Gerät, das von der Emil-Warburg-Stiftung gefördert wurde.

Die nun folgenden Bereiche – obwohl absolut gesehen hier wesentlich weniger Mittel eingesetzt worden sind – sind insofern schon fast lebensnotwendig für die Universität geworden, da z. B. bei Forschungs-

¹ Oberbürgermeister Dr. Dieter Mronz, Stadt Bayreuth, Vorsitzender; Präsident Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Ruppert, Universität Bayreuth, stellv. Vorsitzender; Dr. Peter-Gottfried Meyer-Viol; Dr. Titia de Brauw-Deurvorst; Dipl.-Ing. (FH) Edgar Keck, E.ON Bayern AG, Regionalleitung Oberfranken; Werkleiter Dr. Arno Weiss, British-American Tobacco (Germany) GmbH, Werk Bayreuth; Sparkassendirektor Siegmund Schiminski, Sparkasse Bayreuth; Dipl.-Ing. Karl Fleischer, SIEMENS AG Büro Bayreuth

25 Jahre Emil-Warburg-Stiftung für die Physik der Universität Bayreuth

kurzaufenthalten die staatliche Förderung so gut wie keine Mittel mehr bereitstellt. Ebenso wie bei Symposien ist die unbürokratische und schnelle Finanzierung solcher Aufenthalte außerordentlich wichtig und viele der internationalen Kontakte, die inzwischen von der Physik in viele Teile der Welt bestehen, sind auch durch diese Gelder gefördert worden. So konnten durch diese Forschungskurzaufenthalte Besuche von Nobelpreisträgern, Humboldt-Preisträgern und bekannten Forschern im Bereich der experimentellen und theoretischen Physik gefördert werden. Dies spiegelt die Internationalität des Faches wider, aber zugleich auch das äußerst verdienstvolle Engagement der Emil-Warburg-Stiftung.

Seit vielen Jahren nun gibt es auch eine Preisverleihung der Emil-Warburg-Stiftung, die zunächst für Forschungsergebnisse als Wissenschaftspreis vergeben wurde, aber seit einigen Jahren wurde von der Stiftung auch erkannt, dass es wichtig ist, die technische Unterstützung für ein „Laborfach“ wie die

Physik zu honorieren. Im Einzelnen heißt es für die Verleihung

- des Emil-Warburg-Forschungspreises zu 2.500 €:

Dieser Preis wird an einen promovierten, noch nicht habilitierten Physiker der Universität Bayreuth vergeben, dessen Forschungsarbeit besonders hervorragt. Sie muss an der Universität Bayreuth entstanden sein.

- des Emil-Warburg-Technikpreises zu 1.500 €:

Dieser Preis wird an einen technischen Mitarbeiter der Universität Bayreuth vergeben, dessen Arbeit für Forschungsprojekte im Physikalischen Institut an der Universität Bayreuth besonders hervorragt.

Auf Vorschlag des Physikalischen Instituts der Universität Bayreuth hat der Stiftungsvorstand entschieden, die Emil-Warburg-Preise 2004 an folgende Personen zu vergeben:

- den Emil-Warburg-Forschungspreis an Dr. Christof Krülle, Experimentalphysik V, für seine richtungsweisende Forschung an der Universität Bayreuth auf dem Gebiet „granularer Materie“

- den Emil-Warburg-Technikpreis an Dr. Bernhard Winkler, Rechenzentrum der Universität Bayreuth, für seine herausragende Leistung beim Betrieb von Rechnersystemen

Die vorbildliche Forschungsförderung durch die Emil-Warburg-Stiftung wird von den Mitgliedern des Physikalischen Instituts auch als Verpflichtung für qualitätvolle Forschung auf hohem Niveau gesehen und ihr Dank gilt den Stiftern. Der Erfolg einer Stiftung lässt sich auch daran erkennen, wie sie in anderen Bereichen wirkt. Die Emil-Warburg-Stiftung ist Vorbild für die Otto-Warburg-Stiftung des Universitätsvereins, die 1999 gegründet wurde (ebenfalls mit Unterstützung von Herrn Dr. Meyer-Viol) und die Forschung der Chemie fördert. ■

Warum Emil-Warburg-Stiftung?

Gedanken von Dr. Peter G. Meyer-Viol

Vor 25 Jahren ergriff ich die Initiative zur Errichtung einer nach meinem Großvater Emil Warburg benannten Stiftung. Als ich mit dem damaligen Oberbürgermeister Hans Walter Wild in Verbindung trat sagte er sofort spontan zu, DM 100.000,- im Stadtrat zu beantragen für die neue Stiftung. Außerdem setzte er sich ein, verschiedene Unternehmen dafür zu interessieren, so dass die Stiftung finanziell stark genug wurde, um Forschungsvorhaben der Universität Bayreuth auf dem Gebiet der Physik durch Ausreichung finanzieller Mittel zu fördern und

besondere Leistungen auf diesem Fachgebiet auszuzeichnen.

Warum? Was waren meine Beweggründe nach den Erfahrungen, die ich im Dritten Reich gemacht habe als „Nicht Arier“ mit einem jüdischen Großvater Emil Warburg? Ich zitiere einige Sätze aus eigenem Tagebuch: „Auf der Bayreuther Grundschule empfinde ich zum ersten Mal, was Diskriminierung ist: ich gehöre nicht dazu und verstehe nicht warum. Warum bin ich ein Außenseiter und darf nicht in das Jungvolk der Hitler Jugend eintreten und die Uniform samt dem kleinen

Dolch mit dem Runenzeichen tragen? Warum nennen mich die anderen, auch die Lehrer, Judenbengel? Meine Mutter kann, will mir das nicht erklären, und erst viel später begreife ich, dass ich nicht arisch bin, weil einer meiner Großeltern Jude war. Er hatte sich zwar taufen lassen aber das zählte nach den berüchtigten Nürnberger Gesetzen zufolge nicht. Es wird uns gesagt dass blonde Haare, blaue Augen und ein großer, schlanker Körper arisch seien. Ich verstehe auch nicht, weshalb Zwirns Laden am Markt, in dem wir unsere

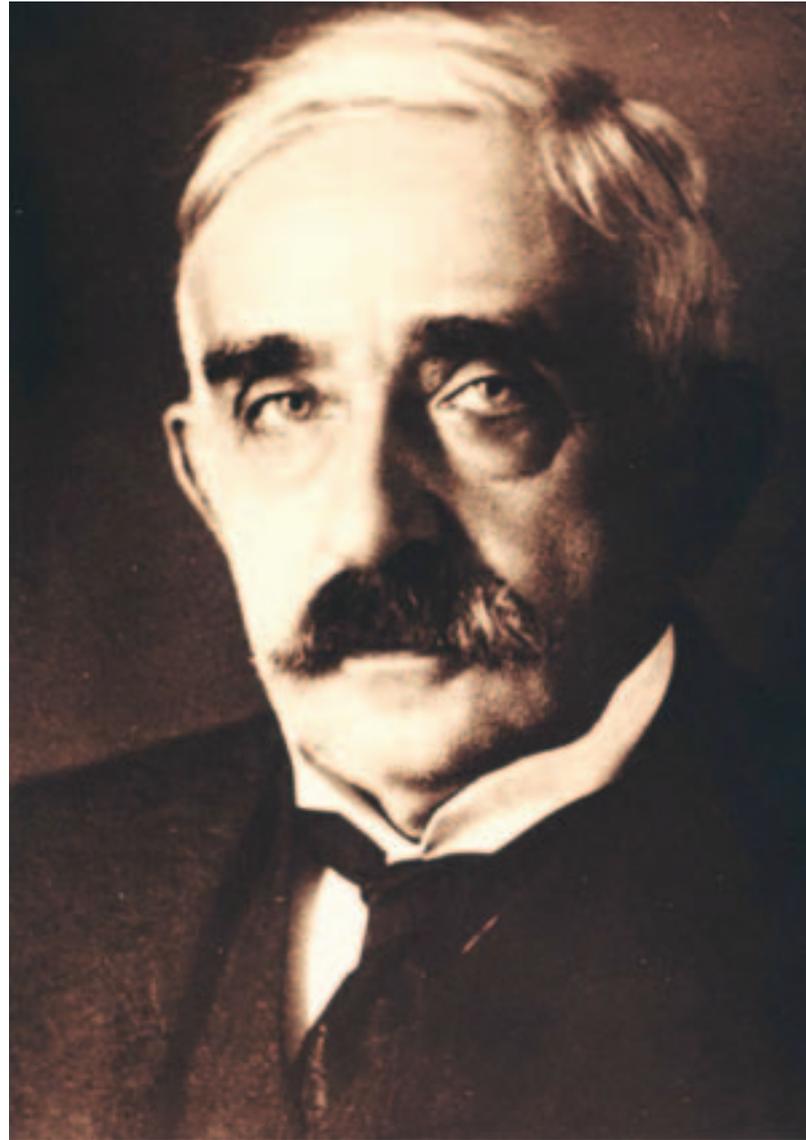
Schuhe kaufen, angezündet wird. Die Bedienung und die Schuhe waren doch sehr gut. In der Schule lerne ich, wie ungezogen es von den Franzosen war, den guten, armen Deutschen den Versailler Vertrag aufzuzwingen und damit dem Land die Ehre zu rauben: „Wenn tausend einen Mann erschlagen, so ist es Ruhm noch ist es Ehr, und heißen wird's in späteren Tagen, gesiegt hat doch das Deutsche Heer.“ - Diese Verse muss ich auswendig lernen. Auf dem Nürnberger Reichsparteitag sehe ich auf dem Wege zum Festplatz, wie ein älterer, grauhaariger Mann von zwei SA Leuten in brauner Uniform durch die Strassen geführt wird. Er trägt ein Schild auf der Brust, auf dem steht: „Ich bin und bleibe Marxist“. Später wurde mir erklärt, das sei ein politisches Schimpfwort. Hinter dem Mann, dem der Schweiß auf der Stirn stand, liefen neugierige Kinder und Frauen her.

Wenn wir in der Turnstunde Krieg spielen, muss ich Franzose sein, und die anderen gewinnen, weil sie Deutsche sind. Oder wir spielen Siegfried und der Drache, wobei ich der Drache bin, und der Deutsche Held Siegfried im Zweikampf siegt. Da ich einen jüdischen Großvater habe, bin ich immer der Verlierer.“ Aus dem Tagebuch meiner Mutter, der Tochter Emil Warburgs, zitiere ich aus Göttingen: „Hier wird den ganzen Tag marschiert. Zweimal die Woche und dann auch noch am Sonntag. Die Studenten haben fast nichts anderes mehr vor als Hitler-Soldaten-Spielen und die übrige Zeit sind sie müde. Man fragt sich, wie lange sie das mitmachen. Eins steht fest: wir haben in Deutschland das ABC überschätzt, denn die Studenten benehmen sich genau wie die Analphabeten. Alle sind selig, Uniform tragen zu dürfen, alle sind selig parieren zu dürfen. Wenn ich die netten jungen Kerle hier um 7 Uhr vorbeimarschieren höre mit Singen wie bei Kriegsbeginn 1914, dann ärgere ich mich ohne zu wissen warum eigentlich. Aber es

ärger mich, dass diese jungen Leute, die doch zu den Gebildeten zählen sollten, parieren wie die Hunde und zwar ungebildeten Schreiern und Volksverführern. Ich ärgere mich dass sie damit einverstanden sind zu marschieren, Uniform zu tragen und Heil Hitler zu schreien. Von diesem Mann sich zwingen zu lassen, seinen Namen dauernd im Mund zu führen, bei jedem Gruß, bei jedem Blick auf diesen Mann zu stoßen, sei es im Schaufenster, sei es in der Zeitung oder an einer Litfasssäule. Ich ärgere mich über die Knechtseele des deutschen Volkes, über seinen unerträglichen Kadavergehorsam.“

Warum interessiere ich mich mit dieser Vergangenheit noch für Bayreuth? Warum kehre ich dem Land, das wir nach Zahlung einer Fluchtsteuer von 100.000,- Goldmark verlassen haben, nicht den Rücken? Die Tatsache, dass ich die Jahre, die so einflussreich sind in einem Menschenleben, in Bayreuth verbracht habe; eine Zeit, die nicht nur positiver Signatur war, ist ein Grund warum mir diese Stadt doch am Herzen liegt.

Dass mein Großvater die letzten Jahre seines schaffensreichen Lebens da verbracht hatte und ich in der Lage war, seinen Namen mit dem der Universität durch die „Emil Warburg Stiftung“ zu verbinden, wurde meinem Gefühl für Tradition gerecht. Ein wichtiger Grund war auch meine Bewunderung für das Elan, mit dem die junge Universität sich einen Platz erobert in den Reihen der älteren und alten



Emil Warburg

Schwesteruniversitäten und sich auf die ihr gestellten Aufgaben richtet; dass dabei die Physik einen ganz besonderen Platz einnimmt war von entscheidendem Einfluss.

Schließlich imponierte mir ganz besonders die Art und Weise, mit der sich Deutschland nach dem Krieg zu einer freiheitsliebenden Demokratie entwickelt hat und die neue Generation sich die demokratischen Tugenden zu eigen machte. In meiner holländischen Zeit habe ich Erfahrung machen können, was eine Demokratie bedeutet und wie schwer es ist sie zu handhaben. Ich hoffe, dass die Stiftung in den kommenden Jahren weiter ihren Aufgaben gerecht werden wird und wünsche ihr eine kreative Zukunft. ■

Das Geheimnis der Schachprogramme



Am 11. Mai 1997 ereignete sich in New York Historisches: mit Garry Kasparovs 2,5 – 3,5 Niederlage gegen den IBM-Großrechner „Deep

Blue“ verlor zum ersten Mal in der Geschichte der amtierende Weltmeister in einem Wettkampf unter regulären Turnierbedingungen gegen einen Schachcomputer. Obwohl Kasparov in diesem Match offensichtlich deutlich unter Normalform agierte und sich in der 6. Partie, für ihn völlig untypisch, sogar einen katastrophalen Eröffnungsfehler geleistet hatte, der den Verlust dieser entscheidenden Partie alsbald nach sich zog, war für viele klar, dass nun die Zeit gekommen war, in der die Computer auch bald noch die letzte „menschliche Bastion“ im Sturm lauffähig erobern würden: die sog. „künstliche Intelligenz“ schicke sich an, der Vorherrschaft des menschlichen Geistes ein für allemal ein Ende zu setzen... Inzwischen sind fast sieben Jahre vergangen und die erste Aufregung vorbei; „Deep Blue“ wurde in seine Einzelteile zerlegt, Kasparov ein Revanchematch verwehrt. Dafür haben in letzter Zeit mehrere Wettkämpfe von Weltklasseschachspielern gegen führende Schachprogramme (trotz des Hardwarenachteils mutmaßlich stärker als „Deep Blue“) gezeigt, dass die Menschheit, was Schach betrifft, noch lange nicht abgehängt ist: die letzten acht endeten allesamt unentschieden.¹ Dieser Artikel soll einen groben Überblick über die Entstehungsgeschichte, Funktionsweise und den Leistungsstand heutiger Schachprogramme geben.

Opfer fiel, kann man seit März 2004 eine Rekonstruktion im Heinz-Nixdorf-Museum Paderborn bewundern.³ Übrigens: Das deutsche Adjektiv „getürkt“ hat seine Ursprünge



Abbildung oben:
Foto des IBM-Großrechners, der 1997 Kasparov besiegte.

1 Die Vorläufer

Man sollte annehmen, dass es Schachprogramme frühestens seit der Entwicklung des ersten Computers geben könne. Umso überraschter wird man feststellen, dass bereits im 18. Jahrhundert ein Schachautomat für Aufsehen sorgte, der sog. „Türke“ von Hofrat Wolfgang von Kempelen; er verdankt seinen Namen einer an einem Schachtablett angebrachten Figur, welche in türkische Gewänder gehüllt war. In den Tisch war allerhand „Technik“ in Form von Zahnrädern und ähnlichem eingebaut. Diese

Maschine war scheinbar in der Lage, selbstständig Züge zu ersinnen und auszuführen; eine kurze Gewinnpartie des „Türken“ gegen Napoleon ist sogar überliefert.² Freilich steckte, wie Kempelen selbst zugab, lediglich ein Trick dahinter; offensichtlich musste sich ein kleinwüchsiger Schachspieler in dem Tisch versteckt halten, dem die Stellung auf dem Brett durch mit den Figuren magnetisch gekoppelte Steine ins Innere übertragen wurde und der über geschickt konstruierte Mechanik seine Züge ausführen konnte. Obwohl der Tisch Mitte des 19. Jahrhunderts einem Brand zum

¹⁾ Das letzte derartige Match war 2003 der Wettkampf Fritz - Kasparov, Endstand 2-2

²⁾ unter www.chesslive.de findet man bei einer Suche nach "Napoleon" die Partie: Napoleon-The Automaton, Wien 1809

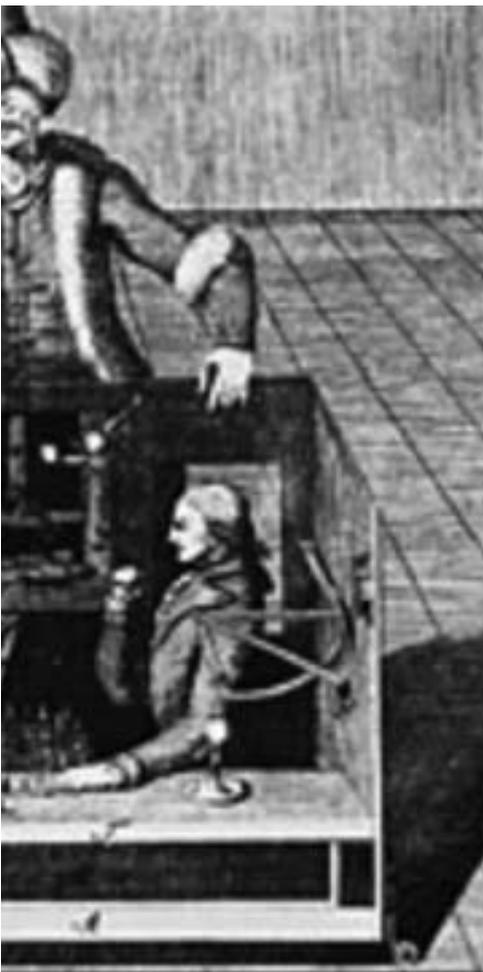
³⁾ www.wdr.de/themen/computer/1/schachtuerke

in genau dieser Automatenattrappe. Eine nette Geschichte, die jedoch streng genommen mit Schachprogrammierung nicht das Geringste zu tun hat. Trotzdem gab es in der Vorcomputerära in diesem Zusammenhang zumindest zwei erwähnenswerte Persönlichkeiten: Zum einen den spanischen Ingenieur Torres y Quevedo, der 1890 einen elektromechanischen Roboter konstruierte, welcher das Mattsetzen mit Turm und König gegen König bewerkstelligen konnte – eine Aufgabe, die zumindest ungeübten Spielern durchaus Schwierigkeiten bereiten kann.

Das erste „vollwertige“ Schachprogramm schrieb dann während des



Museumsfoto des Roboters von Quevedo



Zeichnung des Schachautomaten von Kempelen

zweiten Weltkriegs Alan Turing, der damals übrigens an der Entschlüsselung des Enigma-Codes beteiligt war. Ausgeführt wurden die Operationen mangels geeigneter Hardware nicht auf einem Computer – sondern von Turing selbst per Hand! Umso erstaunlicher, dass er auf diese Weise 1952 tatsächlich unter enormem Zeitaufwand eine Partie gegen den Hobbyspieler Alick Glennie zu Ende bringen konnte - wengleich sein Programm verlor.⁴

2 Grundlagen eines Schachprogramms

Auch als die ersten Computer bereits entwickelt waren, wurde die Diskussion über die günstigste Arbeitsweise eines Schachprogramms

zunächst nur theoretisch geführt. Die grundlegendsten Erkenntnisse stammen vor allem von Claude Shannon, einem Mathematikprofessor aus Amerika. Es kristallisierte sich heraus, dass ein Schachprogramm notwendigerweise folgende Komponenten enthalten sollte: Zunächst einmal muss das Programm natürlich die Schachregeln beherrschen, das heißt, in einer beliebigen Stellung alle regelkonformen Züge ermitteln können. Die hierfür zuständige Routine wird als **Zug-generator** bezeichnet und ist nach Erfahrung des Autors der mit Abstand fehleranfällige (und zugegebenermaßen langweiligste) Teil bei der Programmierung. Dennoch spielt die Implementierung des Zuggenerators eine große Rolle, da die Ausführungsgeschwindigkeit

⁴) Diese Partie ist, zusammen mit einigen interessanten Aspekten zu Turings Programm, unter <http://www.schachcomputer.at/gesch3.htm> vermerkt

Das Geheimnis der Schachprogramme

des Programms nicht unerheblich von deren Effizienz abhängt. Als nächstes muss dem Programm gesagt werden, woran es erkennen kann, welche Positionen günstig und welche ungünstig sind; dies erledigt die sogenannte **Bewertungsfunktion**, welche jeder möglichen Stellung eine ganze Zahl W zuordnet, die für gewöhnlich den Wert der Position aus weißer Sicht repräsentiert. Einer der Hauptfaktoren für die Bewertung einer Stellung ist naturgemäß das Materialverhältnis am Brett: wer mehr oder wertvollere Figuren besitzt, wird in aller Regel im Vorteil sein. Es ist üblich geworden, die Werte in (hundertstel) sog. „Bauerneinheiten“ zu messen. Wenn also Schwarz in einer Stellung bei sonst ausgeglichener Lage einen Bauern mehr auf dem Brett hat, wäre $W = -100$. Aber natürlich gibt es noch andere wichtige Bewertungskriterien: die Sicherheit der beiden Könige etwa, die Aktivität der Figuren, die Bauernstruktur etc. können eine so große Rolle spielen, dass ein materieller Nachteil kompensiert wird; in der Regel wird für jeden dieser Teilbereiche ein Wert bestimmt und am Ende einfach alles zur Gesamtbewertung aufsummiert. Insgesamt besteht also die Kunst bei der Implementierung der Bewertungsfunktion darin, erstens möglichst viele relevante Stellungenmerkmale zu berücksichtigen und zweitens so zu gewichten, dass das Endresultat die „schachliche Realität“ möglichst gut wiedergibt. Zu beachten ist, dass es hier lediglich um eine *statische* Bewertungsfunktion geht, d.h. sie erfolgt ohne Rücksichtnahme auf irgendwelche Zugfolgen. Damit ist klar, dass die auf diese Weise gewonnenen Schätzwerte sehr grob und manchmal gar völlig falsch sind; man denke nur an eine materiell ausgeglichene Stellung, in welcher der Weiße gerade die Damen abtauscht: nach dem

Schlagen der schwarzen Dame hat er erst einmal großen Materialvorteil, die statische Bewertungsfunktion würde also einen sehr hohen (aus schwarzer Sicht schlechten) Wert zurückliefern. Dass die weiße Dame sofort im nächsten Zug wiedergenommen werden kann, bleibt unberücksichtigt. Natürlich kann man versuchen, auch noch angegriffene und gedeckte Figuren bei der Bewertung zu berücksichtigen, um Fälle wie den gerade geschilderten abzufangen. Aber spätestens bei noch komplizierteren Zugfolgen wird man nicht umhin kommen, dass das Programm auch einmal etwas berechnen muss. Hierfür wird ein **Suchbaum** durchlaufen. Er soll hier zunächst in einer vereinfachten Variante dargestellt werden, eine entscheidende Verbesserung wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Das Verfahren ist als sog. „Tiefensuche“ in der Informatik bekannt: ausgehend von der gerade am Brett befindlichen Stellung ermittelt das Programm mittels des Zuggenerators alle regelkonformen Züge und führt „im Geiste“ den ersten möglichen davon aus; in der neu entstandenen Stellung werden nun wiederum alle Züge bestimmt, der erste ausgeführt usw., bis zu einer bestimmten Tiefe t . Ist diese erreicht, schätzt man die entstandene Stellung mittels der Bewertungsfunktion ab; anschließend

wird der letzte Zug zurückgenommen und nacheinander alle Alternativmöglichkeiten durchprobiert, wobei hier noch jeweils unmittelbar im Anschluss die Bewertungsfunktion aufgerufen wird. Sind alle Möglichkeiten untersucht, wird auch der vorletzte Zug zurückgenommen und nun dessen Alternativen getestet, worauf genau das gleiche Verfahren einsetzt (d.h. Ausprobieren aller möglichen Züge und Aufruf der Bewertungsfunktion). Macht man so weiter, hat man am Ende alle Stellungen besichtigt, die sich nach t Halbzügen⁵ ergeben könnten. Wurde für jede dieser Stellungen die Bewertung und der „Pfad“ (d.h. die Züge, die zur Stellung führten) gespeichert, kann man sich einen Baum (wie in der Abbildung unten) generieren: Die Knoten stellen die während des Durchlaufens auftretenden Stellungen dar, die Kanten die Züge, durch welche jeweils die Stellung am oberen Ende der Kante in die am unteren Ende übergeht. Der Baum besteht offensichtlich aus vier horizontalen **Stufen**, der einzelne Knoten auf der obersten Stufe entspricht der Ausgangsstellung, diejenigen auf der untersten Stufe den Stellungen, bei denen die Bewertungsfunktion aufgerufen wird (im Folgenden als **Endknoten** bezeichnet). Geht man davon aus, dass Weiß zu Beginn am Zug ist, so

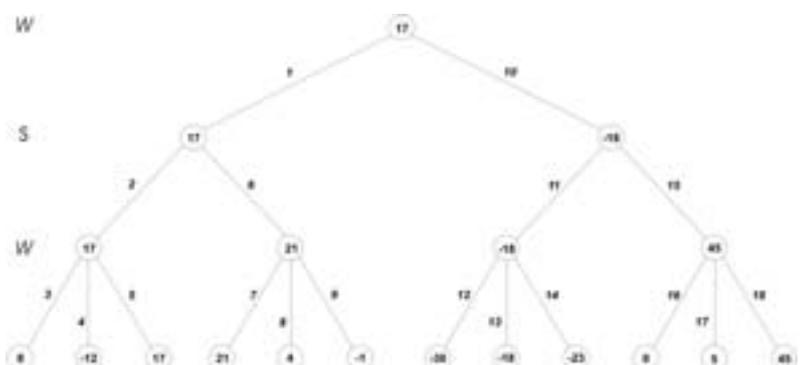


Fig. 1. Beispiel für einen Suchbaum, die kursiv gedruckten Zahlen an den Kanten geben die Durchlaufreihenfolge des Algorithmus an

⁵ Ein „Zug“ dagegen besteht streng genommen aus je einem „Halbzug“ von Schwarz und Weiß; oft ist hiermit aber auch das Gleiche wie bei „Halbzug“ gemeint

erfolgt der zweite Zug von Schwarz, der dritte wiederum von Weiß. Auf der vierten Stufe wird nicht mehr gezogen, sondern lediglich die Stellung bewertet. In allen untersuchten Zugfolgen macht also Weiß den letzten Zug, bevor die Bewertungsfunktion aufgerufen wird. Das Ziel ist jetzt, herauszufinden, welche der beiden Möglichkeiten er im ersten Zug wählen sollte, um die (bei optimalem eigenem und gegnerischem Spiel) bestmögliche Stellung für sich zu erreichen. Dies gelingt, indem man den Baum von hinten „aufrollt“: Zu Beginn kennt man ja nur die Schätzwerte für die Endknoten; da aber Weiß mit seinem letzten Zug stets den größtmöglichen Wert anstreben wird, kann man nun auch allen Knoten auf der vorletzten Stufe einen Wert zuordnen, nämlich das Maximum aus allen Knoten der untersten Stufe, die mit diesem Knoten durch eine Kante verbunden sind. Diese Stellungen entstehen alle nach einem vorhergehenden Zug des Schwarzen; der wird natürlich so spielen, dass eine Stellung mit möglichst niedrigem Wert entsteht. Folglich lassen sich nun auch die Knoten auf der zweiten Stufe bewerten, indem man einfach das Minimum der Werte aus den unmittelbar folgenden Knoten (die ja im Schritt vorher bestimmt wurden) bildet. Analog erfolgt der letzte Schritt: der Weiße wird nun aus seinen beiden Möglichkeiten in der Anfangsstellung die auswählen, welche zur Stellung mit dem höchsten Wert führt; im Beispiel würde er sich also für den linken Teilbaum entscheiden. Wohl-gemerkt: der rechte Ast wird vermieden, obwohl sich in ihm der Endknoten mit dem höchsten Wert aus weißer Sicht (nämlich 45) befindet; das ist aber auch vernünftig, denn um in diesen Knoten zu gelangen, müsste Schwarz im Zug vorher die schlechtere Variante in Gestalt des rechten Teilastes wählen. Da wir aber von bestmöglichem Spiel beider Seiten aus-

gehen, gibt es keinen Grund anzunehmen, dass er dies tun würde. Spielt er stattdessen den Zug zum linken Teilast, käme Weiß mit einem Wert von -18 sogar in Nachteil. Natürlich lässt sich das geschilderte Verfahren auf Bäume jeder Höhe und beliebigen Verzweigungsgrades ausweiten und ist in keiner Weise nur auf Schach beschränkt. Prinzipiell ist damit jedes sog. „Zweispeler-Nullsummenspiel“ (ein Spiel, bei dem zwei Spieler gegeneinander spielen und jeder Vorteil des einen ein entsprechender Nachteil für den anderen ist; daher die Bezeichnung „Nullsumme“) behandelbar. Es muss lediglich der Zuggenerator und die Bewertungsfunktion an das jeweilige Spiel angepasst werden. Dieser Algorithmus erhielt wegen des abwechselnden Maximierens und Minimierens der Werte durch Weiß bzw. Schwarz den schönen Namen „**Minimax**“.

Bei der Implementierung ist es freilich nicht nötig, den Baum als ganzes im Speicher zu haben. Vielmehr kann das Maxi- bzw. Minimieren bereits beim Durchlaufen geschehen; dann müssen zu jedem Zeitpunkt lediglich die gerade untersuchte Stellung, der zu ihr führende Pfad (samt evtl. nötiger Information zum Zurücknehmen der Züge) und die Zuglisten zu den auf dem Pfad vorausgehenden Knoten gespeichert werden. Zur leichteren Formulierung ist es günstig, immer nur zu maximieren und dafür bei Werten, die von Knoten höherer Stufe zurückkommen, das Vorzeichen zu negieren. Mithilfe einer Rekursion lässt sich „Minimax“ im C-Pseudocode dann überraschend kurz formulieren (Kasten rechts oben).

Aufgerufen würde der Algorithmus dann einfach mit „`minimax(0)`“. Selbstverständlich muss man, um wirklich spielen zu können, noch irgendwie dafür sorgen, dass für die Ausgangsstellung nicht nur der Wert, sondern auch der dazugehörige Zug zurückkommt. Wie man

```
//außerhalb definierte Variablen:
//depth: Rechentiefe
//checkMateValue: Konstante für Mattwert
//whiteToMove: zeigt Zugrecht an

int minimax(int c){
    int bestValue;
    if (c>=depth){ //bewerten
        if (whiteToMove)
            bestValue=evaluatePosition();
        else //dann Vorzeichen drehen
            bestValue=-evaluatePosition();
    }
    else{
        //falls kein Zug möglich ->Mattwert
        bestValue=-checkMateValue+c;
        for („each possible move m“){
            executeMove(m);
            int temp=-minimax(c+1);
            if (temp>bestValue)
                bestValue=temp;
            takeBackMove(m);
        }
    }
    return bestValue;
}
```

an der Bezeichnung *checkMateValue* erkennen kann, ist hier auch schon eine kleine schachspezifische Eigenheit berücksichtigt worden: das Matt, welches vorliegt, wenn der König der am Zug befindlichen Partei bedroht ist und sich dies mit dem nächsten Zug nicht mehr abwenden lässt. Erkannt würde es bei dieser Implementierung dadurch, dass die mattgesetzte Partei über keinerlei legale Züge mehr verfügt, so dass der Mattwert (der schlechtest mögliche überhaupt) zurückgeliefert wird. Durch die Addition der Variable *c*, welche einfach die seit der Ausgangsstellung erfolgten Züge zählt, wird zusätzlich die Information mitgegeben, wie lang die Zugfolge zum Matt ist. Könnte der Rechner also in einer bestimmten Stellung ein Matt auf mehrere Weisen erreichen, würde er den kürzesten Weg wählen. Das Patt, bei dem die Partei am Zug auch keine legalen Züge mehr hat, ihr König aber nicht angegriffen ist, muss man noch extra behandeln, doch das soll hier keine Rolle spielen.

Das Geheimnis der Schachprogramme

3 Alpha-Beta-Suche

Theoretisch, entsprechende Geduld und Lebensdauer vorausgesetzt, wäre man mit Hilfe des Minimax-Algorithmus bereits fähig, jedes Zweispieler-Nullsummenspiel, in dem es nur endlich viele mögliche Zugfolgen gibt, auszu analysieren, also u.a. auch Schach (denn die sog. „Fünfzig-Züge-Regel“ besagt, dass nach einer Serie von fünfzig Zügen beider Seiten, in denen nichts geschlagen und kein Bauer gezogen wurde, die Partie mit remis endet). Praktisch ist dies bei einem derart komplexen Spiel vollkommen unmöglich: man gehe von einer gewöhnlichen Schachpartie aus, die in der Regel etwa 80 Halbzüge dauert; im Mittel besitzt jede Partei pro Stellung vielleicht 40 Zugmöglichkeiten. Minimax müsste dann einen Baum mit 40^{80} Endknoten durchlaufen, was selbst „Deep Blue“ mit einer Rechenleistung von etwa 200 Millionen Knoten pro Sekunde mehr als 10^{112} Jahre beschäftigen würde. Bereits für eine Rechentiefe von fünf Halbzügen bräuchte ein heutiges Spitzenprogramm, das auf derzeit handelsüblichen Rechnern vielleicht eine Million Stellungen pro Sekunde berechnen kann, ca. 100 Sekunden. De facto kommt es in dieser Zeit aber auf Rechentiefen von etwa 14-15 Halbzügen; das verdankt es zu einem großen Teil dem folgenden „Trick“: Machen wir uns noch einmal klar, was wir eigentlich wollen. Aus einer vorgegebenen Stellung heraus soll der Zug ermittelt werden, der nach einer Minimax-Suche mit einer bestimmten Tiefe die gemäß der Bewertungsfunktion beste Position verspricht. Das ist etwas anderes als jeden möglichen Zug in einer Stellung genau bewerten zu wollen; es interessiert ja nur der beste. Was beim ersten Lesen vielleicht lediglich spitzfindig klingt, birgt gewaltiges Einsparungspotential in sich: Nehmen wir an, das Programm hat in einem beliebigen Knoten K_0 des Baumes

bereits einige Züge untersucht und für den bisher besten den Wert w_0 aus Sicht der am Zug befindlichen Partei **A** ermittelt. Gemäß des Minimax-Schemas untersucht es nun die nächste Alternative; sollte dann bei der Suche in diesem Teilbaum an irgendeiner Stelle der Gegner **B** die Möglichkeit haben, einen Zug z mit einer Bewertung w_z , die aus Sicht von **A** nicht besser als w_0 ist, zu spielen, so weiß man, dass einer der vorangegangenen Züge von **A** (ab dem Knoten K_0) bereits nicht optimal war, denn den Wert w_0 kann er ja dadurch erreichen, dass er in K_0 den zu w_0 gehörigen Zug wählt. Es ist dann an dieser Stelle unnötig, noch weitere Gegenzüge von **B** auszuprobieren; das vorhergehende Spiel von **A** kann bereits durch z widerlegt werden, ob es noch stärkere Züge gibt, ist uninteressant. Folglich würde an dieser Stelle der Wert w_z als **obere Schranke** für den Wert des letzten Zuges von **A** zurückgegeben und die nächste Alternative zu diesem getestet. Der Wert w_0 kann also bei allen Folgeknoten von K_0 als sicherer Wert für die Partei **A** angesehen werden. Bei den meisten Knoten, die tiefer im Baum liegen, wird es so sein, dass solche sicheren Werte sowohl für Weiß als auch für Schwarz existieren, da für beide bereits in übergeordneten Stellungen alternative Möglichkeiten vollständig berechnet wurden; bei der Untersuchung eines Knotens be-

zeichnet man den zu diesem Zeitpunkt sicheren Wert für die Partei am Zug als **alpha**-, den für den Gegner als **beta**-Wert, wobei alpha stets kleiner beta ist. Dementsprechend heißt dieses Verfahren **alpha-beta-Suche**, die Widerlegung eines Zuges durch einen Gegenzug und die damit verbundene Abschneidung des Suchbaumes „Cutoff“. Der zu untersuchende Baum aus Fig.1 verkleinert sich damit wie in der Abbildung unten zu sehen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass die alpha-beta-Suche erlaubt, **risikolos** bestimmte Äste des Baumes wegzulassen, d.h. es wird genau der gleiche Zug mit dem gleichen Wert als bester ermittelt wie bei der vollständigen Minimax-Suche. Die Einsparung dagegen ist ganz enorm und hängt entscheidend von der Zugsortierung ab: man kann sich leicht überlegen, dass es ungünstig ist, wenn schlechte Züge als erste untersucht werden, denn diese liefern nur niedrige sichere Werte bzw. bewirken nur selten einen Cutoff. Der Idealfall wäre, wenn man in jeder Stellung stets mit dem besten Zug beginnt. Natürlich kann man diesen vorher nicht wissen (dafür führt man den Algorithmus ja erst durch), aber zumindest „ahnen“: im Schach beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass sich ein Schlagzug als bester herausstellt. Folglich wird man, ceteris paribus,

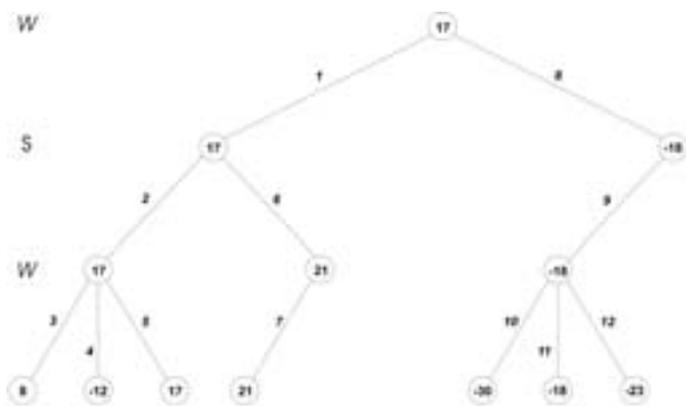


Fig. 2: Reduktion des Baumes durch die alpha-beta-Suche. Widerlegung von Zug (B) durch (7), denn Zug (2) liefert 17 zurück (aus schwarzer Sicht besser als 21); Widerlegung von Zug (B) durch Zug (9), denn Zug (1) sichert bereits einen Wert von 17.

Schlagzüge als erstes ausprobieren, wobei man mit demjenigen beginnt, der die höchstwertige gegnerische Figur beseitigt. Es gibt noch viele weitere Faustregeln zur Zugsortierung im Schach, doch das würde den Rahmen dieses Artikels sprengen; für andere Spiele lassen sich im übrigen in der Regel auch solche Kriterien finden. Nur um ein Gefühl für die Einsparung durch die alpha-beta-Suche zu vermitteln, hier kurz (ohne Begründung) die Zahl zu bewertender Endknoten n beim oben skizzierten Idealfall für einen Baum der Höhe d und (als konstant angenommenem) Verzweigungsfaktor z :

für d ungerade:

$$n = z^{\frac{d+1}{2}} + z^{\frac{d-1}{2}} - 1$$

für d gerade:

$$n = 2 \cdot z^{\frac{d}{2}} - 1$$

Wie man den Formeln entnimmt, steigt die Zahl zu bewertender Endknoten bei Erhöhung der Suchtiefe um einen Halbzug im Mittel um den Faktor \sqrt{z} ; zur Erinnerung: mit dem einfachen Minimax-Algorithmus ist dieser gleich z ! Grob gesprochen kann man also mit der Alpha-Beta-Suche bei gleicher Endknotenzahl etwa doppelt so tief rechnen wie mit Minimax. Im Pseudocode dagegen liest sich Alpha-Beta nicht viel komplizierter, wie der Kasten rechts oben zeigt.

Der Aufruf von der Ausgangsstellung erfolgt durch

```
„alphaBeta(0, -
checkMateValue,
+checkMateValue)“.
```

4 Die Hashtabelle – das Gedächtnis eines Schachprogramms

Bisher wurde immer so getan, als ob verschiedene Zugfolgen auch immer zwangsläufig zu verschiedenen Stellungen führen würden – das ist allerdings im

Schach und in vielen anderen Spielen nicht der Fall. Zum Beispiel führen, wenn keine Schlagfälle o.ä. dabei sind, Zugfolgen vom Typ **A-B-C** und **C-B-A** zur gleichen Stellung. Es wäre unvorteilhaft, die komplette Suche noch einmal in der Stellung nach **C-B-A** durchzuführen, wenn die Stellung **A-B-C** bereits untersucht wurde. Oftmals kann nämlich das Ergebnis unverändert übernommen werden (die Einschränkung ergibt sich durch evtl. andere alpha- und beta-Werte beim Aufruf!). Es wäre also sinnvoll, wenn das Programm sich merken würde, welche Stellungen es bereits untersucht hat und zu welchem Ergebnis es ggf. gekommen ist. Alle modernen Schachprogramme tun dies auch und speichern diese Ergebnisse in einer sogenannten „**Hashtabelle**“. Es kann allerdings durchaus vorkommen, dass die gleiche Stellung während einer Suche mehrmals bei einer unterschiedlichen Zahl vorangegangener Züge und entsprechend höherer bzw. niedrigerer Resttiefe besichtigt wird. Beispielsweise ist nach Zugfolgen der Form **B-C-B⁻¹-C⁻¹-A** und dem einzelnen Zug **A** die gleiche Stellung entstanden, im ersten Fall aber vorher vier Züge mehr ausgeführt worden. Um zu vermeiden, dass nun nach Ausführung des Zuges **A** auf das Ergebnis der Suche zu **B-C-B⁻¹-C⁻¹-A** zurückgegriffen wird (denn dort war die verbleibende Resttiefe vier Halbzüge niedriger, das Ergebnis ist dementsprechend unzuverlässiger), muss das Programm sich auch noch merken, welche Tiefe die Suche hatte, auf der der Eintrag basiert (und eigentlich auch noch, ob der gespeicherte Wert exakt war oder lediglich eine obere bzw. untere Schranke für die Partei am Zug darstellt, wie es in der Alpha-Beta-Suche häufig passiert; dieser Aspekt bleibt hier allerdings unberücksichtigt). Stößt es dann während seiner Berechnungen mit Resttiefe d auf eine Stellung, zu der zwar ein Hasheintrag existiert, der allerdings

```
//außerhalb definierte Variablen:
//depth: Rechentiefe
//checkMateValue: Konstante für Mattwert
//whiteToMove: zeigt Zugrecht an

int alphaBeta(int c,int a,int b){
  if (c>=depth){ //bewerten
    if (whiteToMove)
      return evaluatePosition();
    else //dann Vorzeichen drehen
      return -evaluatePosition();
  }
  else{
    //Mattwert ist ggf. sicher
    a=max(a,-checkMateValue+c);
    for („each possible move m“){
      executeMove(m);
      int temp=-alphaBeta(c+1,-b,-a);
      takeBackMove(m);
      if (temp>=b)
        return temp; // -> Cutoff
      else if (temp>a)
        a=temp; //alpha verbessert
    }
    return a;
  }
}
```

auf einer Suche mit Tiefe $d' < d$ beruht, so wird die Hashinformation ignoriert; ist dagegen $d' \geq d$, so kann der Eintrag ausgewertet werden; bei $d' > d$ verbessert sich die Qualität der Suche sogar ein wenig. Eine weitere Verbesserung kann erzielt werden, wenn man sich zusätzlich zu jeder Stellung den besten oder den Zug, der zum Cutoff führte, abspeichert. Diese Information kann man auch im Falle $d' < d$ nutzen, denn der beste Zug bei Resttiefe d' ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei Tiefe d noch gut. In diesem Fall unterstützt die Hashtabelle also die Zugsortierung, die ja wie gesehen für eine effiziente Alpha-Beta-Suche sehr wichtig ist. Auf die genaue Implementierung der Hashtabellenfunktion soll hier nicht eingegangen werden; es sei aber erwähnt, dass aus Speicherplatzgründen die Zahl der Hasheinträge (die gelegentlich auch als „**Slots**“ bezeichnet werden) begrenzt

Das Geheimnis der Schachprogramme

werden muss. Da ein modernes Programm in der Regel viel mehr Stellungen besichtigt, als Slots zur Verfügung stehen, müssen häufig bereits bestehende Einträge überschrieben werden, wobei natürlich Information und damit Suchgeschwindigkeit verloren geht. Die Spielstärke eines Schachprogramms hängt also nicht unwesentlich von der Größe des Hauptspeichers ab, der ihm zur Verfügung gestellt wird.

5 Iterative Suche

Will man mit einem Schachprogramm arbeiten oder gar an einem Turnier teilnehmen, so ist es ziemlich ungünstig, wenn zur jeweiligen Brettstellung immer nur eine Suche mit festgelegter Tiefe gestartet und erst nach deren Beendigung das Resultat ausgegeben wird. Oftmals kann ja der Zeitverbrauch hierfür gar nicht zuverlässig vorhergesagt werden, da er sehr stark von der Struktur der gerade am Brett befindlichen Stellung abhängt. Vielmehr sollte das Programm sich sofort eine „Meinung“ bilden und diese dann Schritt für Schritt durch genauere Untersuchung verifizieren oder ggf. ändern; kommt dann während der Partie der Moment, in dem gezogen werden sollte, so wird einfach das Resultat der letzten Untersuchung als Grundlage für die Zugwahl herangezogen. Eine einfache und trotzdem sehr wirkungsvolle Methode ist hierfür die Technik der sog. „**iterativen Suche**“: statt die Brettstellung bereits von Beginn nur mit einer bestimmten Suchtiefe t abzusuchen, startet man mit $t=1$ und erhöht t dann schrittweise jeweils um eins. Jedes mal erfolgt dabei eine gewöhnliche Alpha-Beta-Suche der Tiefe t ; es hört sich vielleicht widersinnig an, auch die Resultate für niedrigere Tiefen zu berechnen, wenn doch letztlich nur das Ergebnis für die höchste interessant ist. Doch zum einen kann man, wie erwähnt, die im vorgesehenen Zeitrahmen erreichbare Tiefe nicht immer vor-

hersehen; zum anderen ist es paradoxerweise in der Regel sogar effizienter, die Suchtiefe Stück für Stück zu erhöhen. Dies liegt vor allem in der exponentiell mit t wachsenden Zahl an Endknoten und der Möglichkeit zur besseren Zugsortierung begründet: erstere bewirkt, dass der Aufwand für die vorhergehenden Tiefen gegenüber dem für die letzte vergleichsweise gering ist. Zweitere ist gegeben, weil die bei den niedrigeren Tiefen in der Hashtabelle gespeicherte Information, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, für die Zugsortierung verwendet werden kann.

6 Die Ruhesuche

Nun soll eine Lösung zu einem (schachspezifischen) Problem vorgestellt werden, das der bisher vorgestellte Algorithmus mit sich bringt. Würde man tatsächlich immer nur fix bis zu einer festen Tiefe rechnen, so käme es am Ende der Varianten, die das Programm ausgibt, meist zu einem wahren „Gemetzeln“. Der Grund: da nach Erreichen der vorgesehenen Suchtiefe nicht mehr weitergerechnet wird, werden auch einstehende Figuren nicht mehr erkannt; die Partei, die den letzten Zug ausführen darf, könnte also ungestraft gedeckte Steine schlagen und würde dafür auch noch mit einem hohen Wert belohnt, weil das mögliche Wiederschlagen nicht mehr erfasst wird. Dieser Effekt kann bei längeren Schlagfolgen auch schon ein paar Halbzüge vor Erreichen der Endknoten eintreten. Die auf diese Weise ermittelten besten Züge wären dann oft zufälliger Natur. Grundsätzlich wäre es also besser, wenn die Bewertungsfunktion erst dann aufgerufen wird, wenn „Ruhe“ am Brett herrscht, d.h. fürs erste keine Schlagzüge mehr möglich sind. Da solche Stellungen jedoch oft viel zu spät eintreten, behilft man sich folgendermaßen: ist die entsprechende Tiefe erreicht, so wird der Wert, den die Bewertungsfunk-

tion zurückliefert, als sicherer Wert für die Partei am Zug angesehen. Weiterhin werden nun aber auch noch alle Schlagzüge untersucht; nach Ausführung eines solchen wird wieder der Wert der entstandenen Stellung bestimmt. Diesen hat nun die gegnerische Partei sicher und jetzt werden für diese alle Schlagzüge untersucht und so weiter. Jede Partei kann also, wenn sie am Zug ist, noch eine Schlagserie beginnen oder „aussteigen“. Auf diese Weise wird das oben geschilderte Problem vermieden, denn es ist sichergestellt, dass auf jedes Schlagen das evtl. mögliche Wiederschlagen erkannt wird. Da die Zahl der Schlagzüge in aller Regel sehr gering ist und sich Schlagfolgen auch noch selbst begrenzen (im Schach ist hier nach spätestens dreißig Zügen mangels Material Schluss...), ist der Zusatzaufwand nicht allzu extrem, das Spiel des Programms wird jedoch merklich verbessert.

7 Weniger ist manchmal mehr: der Nullzug

Als Abschluss der Betrachtungen zur Funktionsweise von Schachprogrammen hier noch ein Beispiel für eine, im Gegensatz zur Alpha-Beta-Suche, risikobehaftete Form der Suchbaumreduktion: Schach ist ein Spiel, bei dem es normalerweise immer eine bessere Alternative gibt, als einfach „auszusetzen“ (sprich: dem Gegner das Zugrecht zu überlassen), was die Regeln im übrigen nicht erlauben. Deshalb ist es sehr wahrscheinlich, dass ein Zug, der sich durch die (fiktive) Möglichkeit des Aussetzens widerlegen ließe, auch durch einen regelkonformen Zug als schlecht nachgewiesen werden kann. Darauf basiert die Idee des sog. „**Nullzugs**“, mit dem eben genau jenes Aussetzen bezeichnet wird. Bevor auf einen Zug z überhaupt mittels des Zuggenerators alle legalen Gegenzüge ermittelt werden, probiert man, sofern kein Schachgebot vorliegt, erst einmal aus, welche Folgen der

Nullzug hätte und zwar mit einer gewöhnlich um 2-3 Halbzüge reduzierten Tiefe. Wenn z ein sinnloser Zug ist oder die gegnerische Stellung gar verschlechtert, so wird er durch den Nullzug widerlegt werden können und aufgrund der reduzierten Tiefe deutlich schneller. Natürlich ist das nicht ganz unproblematisch, könnte es doch durchaus sein, dass eine durch z aufgestellte, langzügige Drohung aufgrund der Tiefenreduktion übersehen wird. Da aber mit dem Nullzug auf das eigene Zugrecht verzichtet wurde, stehen die Chancen gut, dass einer der legalen Züge die Drohung pariert hätte und der Cutoff doch zu Recht durchgeführt wurde. Ein Problem sind jedoch die seltenen, aber gerade bei wenig verbliebenem Material immer wieder auftretenden Zugzwangstellungen, in denen eine Seite ihre Stellung mit jedem Zug nur verschlechtern kann. Solche Fälle werden dann ohne entsprechende Verfeinerungen der Nullzugtechnik nicht mehr erkannt, denn die betroffene Partei würde einfach auf das in der Realität nicht mögliche Aussetzen vertrauen. Insgesamt erreicht man mit dem Einsatz des Nullzuges aber deutlich höhere Suchtiefen, was das damit verbundene Risiko mehr als kompensiert.

8 Heutiger Leistungsstand

Fast alle der hier vorgestellten Techniken dürften auch in den derzeit führenden Schachprogrammen eingesetzt werden. Daneben verfügen deren Autoren mit Sicherheit noch über einige Eigenentwicklungen, die Sie jedoch hüten wie Ihren Augapfel. Diese ermöglichen es Ihren Programmen im Zusammenspiel mit der immer schneller werdenden Hardware, selbst absoluten Weltklassenspielern Paroli zu bieten, wie eingangs bereits geschrieben. Allerdings soll nicht unerwähnt bleiben, dass diese Leistungsfähigkeit nach wie vor hauptsächlich auf der enormen

Rechengewalt und weniger auf einem tieferen Verständnis des Spieles beruht. Immer noch lassen sich problemlos Stellungen konstruieren, in denen jeder durchschnittliche Vereinsspieler besser aussieht als die Maschinen. Offenbar ist es noch niemandem gelungen, ein "intelligentes" Programm zu entwickeln, das in praktischen Partien vergleichbare Resultate liefern könnte. Auch die in manchen Programmen eingesetzten Mechanismen zum selbstständigen Dazulernen sind nach Kenntnis des Autors bisher nur sehr rudimentär entwickelt und umfassen kaum mehr als die Vermeidung einer züggenauen Wiederholung

von Verlustpartien. Das auf diesem Gebiet aber einiges möglich sein sollte, wird deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, wie ein menschlicher Schachspieler zu seinen Ergebnissen kommt: wenn er gut ist, kann er vielleicht 100-200 Stellungen wirklich berechnen, bevor er seinen Zug wählt. Verglichen mit den zig Millionen, auf die es ein Schachprogramm bringt, fast beschämend wenig. Und dennoch können die besten Menschen immer noch mit den Rechnern mithalten und sogar Partien gegen sie gewinnen. Es wird spannend sein zu beobachten, wie lange dieser Zustand noch anhält... ■

Der Autor (rechts) mit „Jonny“ gegen den amtierenden Weltmeister „Shredder“ von Stefan Meyer-Kahlen (links) bei der Computer-WM in Graz 2003



