

# SPEKTRUM

Das Wissenschaftsmagazin der Universität Bayreuth ■ 14. Jahrgang ■ Ausgabe 1 ■ August 2018

THEMA

## Planet Erde

**INNENWELTEN**

Zeitreisen ins Erdinnere

SEITEN 18-21

**LEBENSWELTEN**

Migration als Lebensform

SEITEN 64-67

**AUSSENWELTEN**

Nahrungsproduktion im Weltall

SEITEN 82-86

# Liebe Leserinnen und Leser,



■ Prof. Dr. Stefan Leible, Präsident der Universität Bayreuth.

**F**ast ein halbes Jahrhundert ist vergangen, seit Apollo 8 aus einer Mondumlaufbahn die ersten Bilder unseres „blauen Planeten“ zur Erde übermittelt hat. Seitdem haben rasante wissenschaftlich-technologische Entwicklungen wesentlich dazu beigetragen, dass die Sensibilität für die globale Vernetzung unserer Lebensbedingungen und -räume überall gestiegen ist. Insbesondere die Digitalisierung hat die Erde endgültig zum „global village“ werden lassen.

Mit ihren interdisziplinären Profildern wirkt die Universität Bayreuth in vielerlei Hinsicht an der Erforschung unseres Planeten mit. In der Hochdruck- und Hochtemperaturforschung ist sie weltweit führend bei der Aufklärung von Materialstrukturen und Prozessen im Erdinneren. Projekte auf dem Gebiet der Ökologie und Umweltwissenschaften reichen von den klimatischen Verhältnissen in der eigenen Region bis hin zur Biodiversität in tropischen Regenwäldern und den zunehmend durch Mikroplastik gefährdeten Weltmeeren. Die Dynamik von Grenzräumen und Migrationsprozessen und die darin begründeten Herausforderungen sind Gegenstand der geographischen Forschung.

Unsere neue SPEKTRUM-Ausgabe macht an ausgewählten Beispielen sichtbar, dass grundlagenorientierte Forschung häufig eng verzahnt ist mit konkreten Problemlösungen – sei es in der Klima- und Wetterforschung, im Naturschutz, der Entwicklung neuer Materialien oder der Raumfahrt. Politik und Öffentlichkeit sind momentan zwar verstärkt geneigt, den Blick auf nationale und regionale Identitäten zu richten. Doch globale Wechselwirkungen werden sich weiter verdichten und neue Anforderungen an eine international vernetzte Forschung und Lehre stellen. Die Faszinationskraft unseres Planeten wird dabei erhalten bleiben. Es war die Schönheit der Erde, die den Kommandanten der Apollo 8-Mission vor 50 Jahren zu dem legendären Ausruf veranlasste: „Wow, is that pretty!“

Mit besten Grüßen,

Ihr

Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth

## Weitere SPEKTRUM-Ausgaben

Auf der Homepage der Universität Bayreuth finden Sie unter anderem auch die vorigen SPEKTRUM-Ausgaben zu den folgenden Themen:

- 2/2017: Nachhaltigkeit
- 1/2017: Governance
- 2/2016: Molekulare Biowissenschaften
- 1/2016: Innovationen
- 2/2015: Digitalisierung
- 1/2015: Kulturbeggnungen und transkulturelle Prozesse
- 2/2014: Energie
- 1/2014: Recht und Moral
- 1/2013: Lebensmittel- und Gesundheitswissenschaften

- [www.uni-bayreuth.de/de/universitaet/presse/spektrum](http://www.uni-bayreuth.de/de/universitaet/presse/spektrum)

Vom Erdinneren bis ins Weltall reichen die Beiträge, die unsere neue SPEKTRUM-Ausgabe zum Thema „Planet Erde“ vereint. Sie enthalten zahlreiche Beispiele dafür, wie geo-, umwelt- und naturwissenschaftliche Disziplinen sich mit Strukturen und Prozessen befassen, die eine globale Dimension haben, aber verschiedene Regionen und Lebenswelten auf spezifische Weise beeinflussen können. Dabei wird deutlich: Ohne ein dichtes Netzwerk internationaler Kontakte wären die im folgenden vorgestellten Forschungsprojekte nicht möglich. Um die Welt zu erkunden, bedarf es eines engagierten, Grenzen überschreitenden Pioniergeistes.

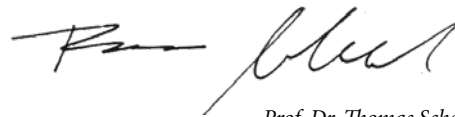
Daher baut die Universität Bayreuth ihre Zusammenarbeit mit namhaften internationalen Partnern in Forschung und Lehre stetig aus. So hat sie vor kurzem ein Gateway Office in Melbourne eröffnet, um die Kooperationen mit ihren Partneruniversitäten in Australien, insbesondere der University of Melbourne und der Monash University, weiter zu intensivieren. Bereits seit zwei Jahren gibt es auf dem Campus der Shanghai International Studies University ein entsprechendes Auslandsbüro, das als Serviceeinrichtung für Forschende, Lehrende und Studierende eine wachsende Anziehungskraft entwickelt. Die Universität Bayreuth ist ein engagierter Partner

in den bayerischen Hochschulzentren für China und Lateinamerika, und auf dem Gebiet der Afrikastudien genießt sie nicht nur bei ihren Partneruniversitäten in allen Regionen des afrikanischen Kontinents, sondern auch weltweit höchste Wertschätzung. Im bundesweiten Vergleich ist die Universität Bayreuth äußerst attraktiv für herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Ausland, die mit einer Förderung durch die Alexander von Humboldt-Stiftung für Forschungsaufenthalte nach Deutschland kommen. Auch andere Rankings belegen diese internationale Sichtbarkeit.

Alle diese Entwicklungen zeigen: Die Welt ist auf dem Bayreuther Campus zuhause, und der Bayreuther Campus in der Welt.

Viel Freude bei der Lektüre wünscht Ihnen

Ihr



Prof. Dr. Thomas Scheibel  
Vizepräsident der Universität Bayreuth  
für die Bereiche Internationalisierung,  
Chancengleichheit und Diversity



■ Prof. Dr. Thomas Scheibel ist Inhaber des Lehrstuhls für Biomaterialien an der Universität Bayreuth

IMPRESSUM

SPEKTRUM-Magazin der Universität Bayreuth

**Auflage:**  
1.500 Stück

**Herausgeber:**  
Universität Bayreuth  
Stabsabteilung Presse, Marketing  
und Kommunikation (PMK)  
95440 Bayreuth  
Telefon (09 21) 55 - 53 56 / - 53 24  
Telefax (09 21) 55 - 53 25  
pressestelle@uni-bayreuth.de

**Redaktionsleitung:**  
Christian Wißler (V.i.S.d.P.)

**Druck:**  
bonitasprint gmbh, Würzburg

**Satz und Layout:**  
GAUBE media agentur, Bayreuth  
www.gaube-media.de

**Bildquellen-Kennzeichnung:**  
sst: www.shutterstock.com  
pxb: www.pixabay.com



■ Christian Wißler M.A.,  
Fachwirt Public Relations (BAW),  
Stabsabteilung PMK  
der Universität Bayreuth,  
Wissenschaftskommunikation.

Alle Beiträge sind bei Quellenangaben und Belegexemplaren frei zur Veröffentlichung.

■ Titelseite: Der Vulkan Mayon auf Luzon, der größten Insel der Philippinen (sst).

■ Abb. links: Vor dem Eingang zu den Gewächshäusern des Ökologisch-Botanischen Gartens (ÖBG) der Universität Bayreuth zeigt eine Weltkugel die Klimazonen der Erde in verschiedenen Farben (Foto: Christian Wißler).

# Planet Erde

- 
- 2 Grußwort**  
Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth
  - 3 Editorial**  
Prof. Dr. Thomas Scheibel  
Vizepräsident der Universität Bayreuth  
für die Bereiche Internationalisierung,  
Chancengleichheit und Diversity
  - 3 Impressum**
  - 4 Inhaltsverzeichnis**
- 

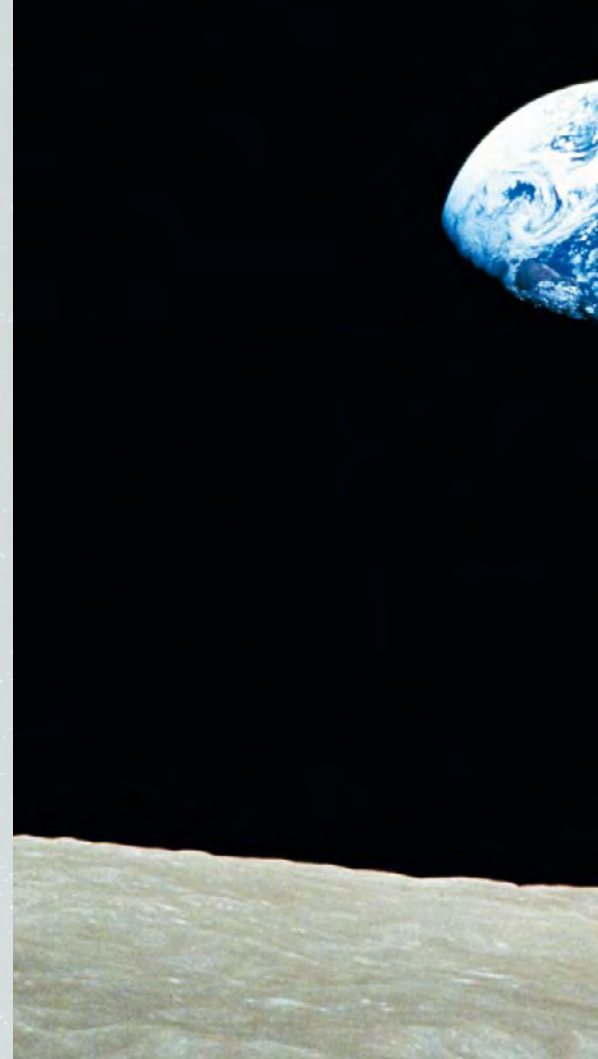
## Anfänge

- 6 Die Entstehung der Erde**  
Von der Molekülwolke zu den  
Planeten unseres Sonnensystems



## Innenwelten

- Dynamik der Erde**  
Geoforschung und Materialwissen-  
schaft erkunden unseren Planeten
- 11 Erdbeben in der Tiefe**
- 12 Elektrisch leitfähig: der Erdmantel**
- 13 Kohlenstoff in Bewegung**
- 14 Der tiefe Stickstoff-Kreislauf  
der Erde**
- 16 Von der Geoforschung zu  
Hightech-Materialien**
- 17 Atomare Strukturen im  
Röntgenlicht**



- 18 Zeitreisen ins Erdinnere**  
Lichtsignale weisen den Weg  
zur Aktivität von Vulkanen
- 22 Vulkanfahrten im Labor**  
Was vulkanische Gase über  
Aktivitäten im Erdinneren verraten

## Lebenswelten

- 26 Ozeanische Paradiese**  
Korallenriffe und Inselstrände:  
kostbar und von Zerstörung bedroht
- 30 Laboratorien der Evolution**  
Fallstudien zur biologischen Vielfalt  
in Tropenwäldern
- 34 Ein Garten für die Welt**
- 36 Europäische Schutzgebiete**  
Neue Studie zeigt facettenreiche  
Beiträge zur biologischen Vielfalt
- 40 Das wechselnde Pflanzenkleid  
der Erde**  
Satelliten erschließen neue Wege  
der ökologischen Forschung



■ Das erste Farbfoto des Planeten Erde im Weltall entstand am 24. Dezember 1968 und wurde unter dem Namen „Earthrise“ berühmt. Fotograf war der US-amerikanische Astronaut William Anders an Bord von Apollo 8, dem ersten bemannten Raumflug zum Mond (Foto: NASA / William Anders).



60 Forschungsreisen entlang der Via regia in Mittel- und Osteuropa, wie hier nach Wrocław: Ausgangspunkt für Grenzen überschreitende Projekte (Foto: N. Teufel).

60

44 **Grünlandverluste – was bedeutet das für uns?**  
Zum Rückgang des Grünlands in Bayern und seinen Folgen

48 **Wetter- und Klimaforschung verbindet**  
Forschungsnetzwerke in Oberfranken und Afrika

52 **Ökologische Kalender**  
Anpassungen an den Klimawandel auf dem Dach der Welt

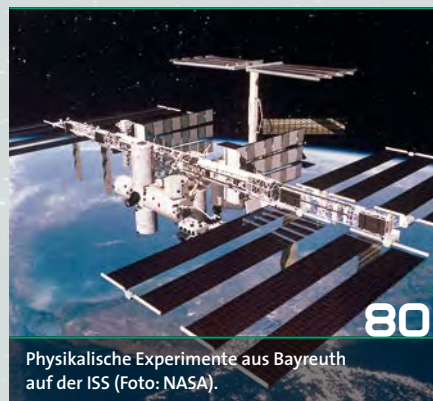


52 Die Folgen des Klimawandels im Pamir werden im Dialog mit der lokalen Bevölkerung erforscht (Foto: I. Haag).

56 **Das Anthropozän**  
Realität oder akademische Konstruktion?

60 **Grenträume in Bewegung**  
Neue Impulse für Mittel- und Osteuropa durch Forschung und Studium

64 **Migration als Lebensform**  
Mobilität zwischen Stadt und Land in Subsahara-Afrika



80 Physikalische Experimente aus Bayreuth auf der ISS (Foto: NASA).

80

68 **Wechselnde Perspektiven**  
Raumwahrnehmungen und Bewertungen im Geographieunterricht

## Außenwelten

72 **Auf ins Weltall!**  
Ein EU-Projekt lässt Schülerinnen und Schüler eigene Marsflüge planen

76 **Exoplaneten**  
Bunte Welten jenseits unseres Sonnensystems

## Forschung auf der ISS

80 **Neue Einblicke in die Welt der Fluide**

81 **Energiequellen für die Raumfahrt**

82 **Nahrungsproduktion im Weltall**  
Experimente aus Bayreuth in der Schwerelosigkeit

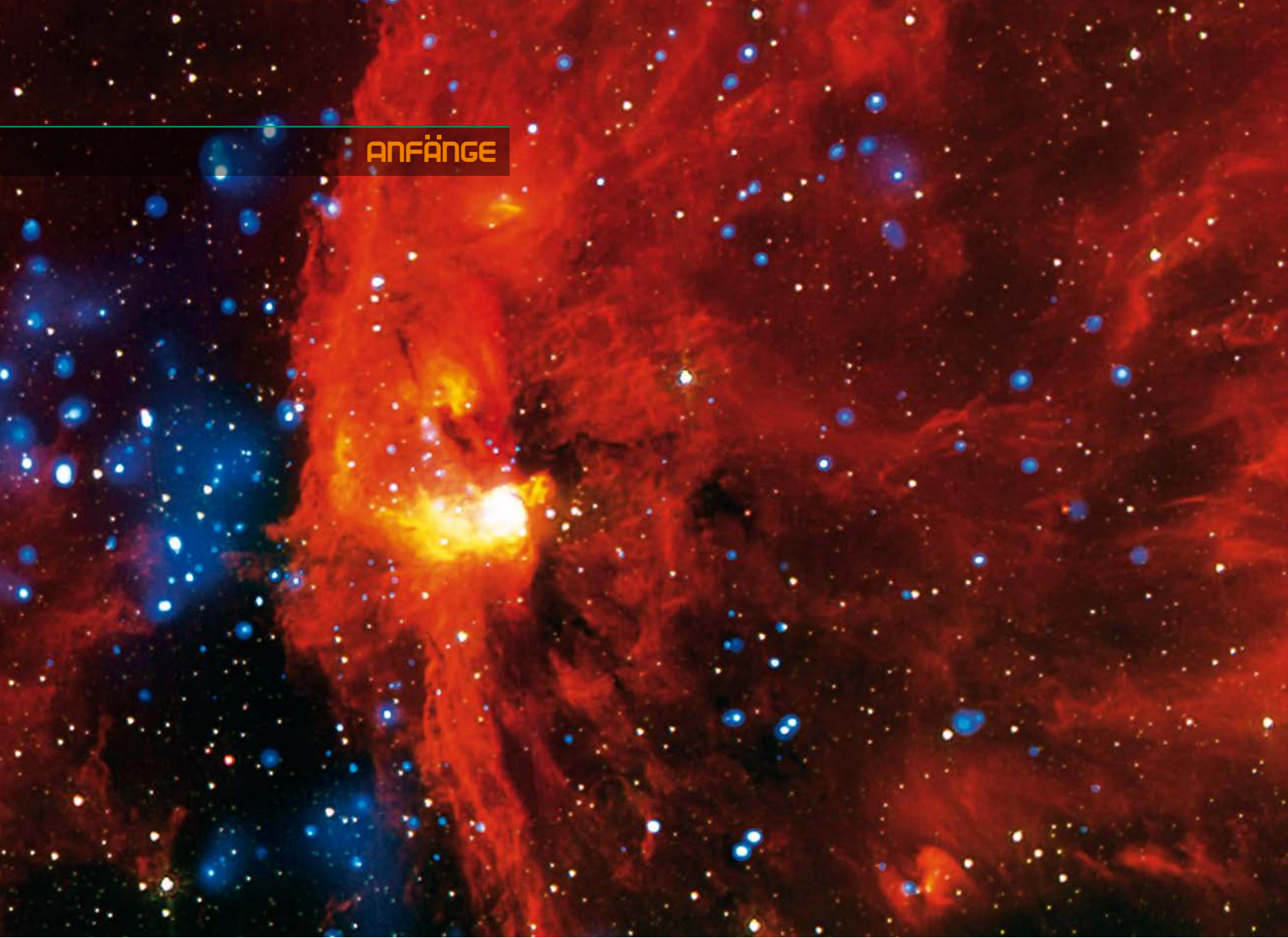


82 Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme können wichtige Beiträge für die künftige Raumfahrt leisten (Foto: Blue Origin).

82

## Prinzipien des Lebens

87 **Der Entstehung des Lebens auf der Spur**



■ David Rubie

# Die Entstehung der Erde

Von der Molekülwolke zu den Planeten unseres Sonnensystems

■ Die Aufnahme des NASA-Weltraumteleskops Hubble zeigt die Region RCW 108 unserer Milchstraße. Hier bilden sich, rund 4.500 Lichtjahre von der Erde entfernt, neue Sterne heraus. In der Astronomie wird diese Region deshalb auch als „Sternenwiege“ bezeichnet (Foto: NASA).

Die inneren vier Planeten unseres Sonnensystems Merkur, Venus, Erde und Mars werden auch terrestrische Planeten genannt, da sie ähnlich wie die Erde aus Silikatgestein und Metall bestehen. Dagegen enthalten die Gasplaneten Jupiter und Saturn hauptsächlich Wasserstoff. Die acht Planeten unseres Sonnensystems sind vor etwa 4,6 Milliarden Jahren entstanden, als eine aus Wasserstoff, Helium und interstellarem Staub bestehende Molekülwolke aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft kollabierte. Es entwickelte sich dabei eine flache rotierende Scheibe aus Gas und Staub: der Sonnennebel. Im Zentrum des Sonnennebels bildete sich die Sonne. Nahe der Sonne waren die Temperaturen so hoch, dass nur gasförmige Materie vorhanden war. Später kühlte sich der Sonnennebel ab und es kam zu umfangreichen Kondensationsprozessen. Zunächst kondensierten primär aus Kalzium und Aluminium bestehende Hochtemperaturminerale. Sie haben in einigen Fällen als Einschlüsse in Meteoriten „überlebt“ und repräsentieren mit einem Alter von 4,567 Milliarden Jahren die älteste feste Materie des Sonnensystems. Die Abkühlung setzte sich fort, und es begannen magnesium- und siliziumhaltige Minerale wie Olivin und Pyroxen zu kondensieren.

Die weitere Entwicklung stellt sich die Forschung im Wesentlichen folgendermaßen vor: Mikrometergroße Teilchen, bei denen es sich um Kondensationsprodukte des sich abkühlenden Sonnennebels oder um Aggregate interstellarer Staubkörner handelt, sammeln sich in der Zentralebene des frühen Sonnensystems. Hier wachsen sie durch Zusammenstöße zu zentimetergroßen Objekten, die sich infolge weiterer Kollisionen zu meter- oder kilometergroßen Körpern entwickeln. Haben die Gesteinsbrocken einmal Dimensionen von Kilometern erreicht, so bestimmt die Gravitation das weitere Wachstum. Kleinplaneten oder Planetoiden mit Durchmessern von einigen Kilometern entstehen durch rasche Akkretion (Zusammenballung) lokalen Materials.

Das weitere Wachstum führt dann zu mond- bis marsgroßen Objekten, die „Embryos“ genannt werden. Die Entstehung dieser Embryos geschieht sehr rasch, da größere Körper auf Kosten von kleineren wachsen und sich so das Wachstum ständig beschleunigt. Die so gebildeten Embryos sind die Bausteine der inneren Planeten. Wechselseitige, durch die Schwerkraft bedingte Störungen der Umlaufbahnen von Embryos verursachen weitere Zusammenstöße, die schließlich zur Bildung der inneren Planeten des Sonnensystems führen.

## Computer simulieren die Entstehung der terrestrischen Planeten

Gewaltige Kollisionen zwischen Embryos sind charakteristisch für die letzte Phase der Akkretion. Solche Prozesse können heute im Computer simuliert werden. Typische Modellrechnungen beginnen mit einer protoplanetaren Scheibe, die bis zu 100 Planetenembryos und Tausende kleinerer Planetoiden enthält. Da die Embryos sowohl miteinander als auch mit den Planetoiden durch Kollisionen verschmelzen, nimmt die Gesamtzahl der festen Körper in der Scheibe ständig ab, während die Masse der verbleibenden Embryos zunimmt. Nach etwa 100 Millionen Jahren sind auf diese Weise zwischen drei und fünf Planeten mit Massen und Abständen von der Sonne entstanden, die der heutigen Struktur des inneren Sonnensystems recht nahe kommen.<sup>1</sup> Eine Ausnahme ist jedoch der Mars. Alle Modellrechnungen lieferten einen Planeten Mars, der mindestens um das Zehnfache zu groß war. Demgegenüber entsprachen die Ergebnisse für die Erde und die Venus in etwa den tatsächlichen Größen dieser zwei Planeten.

Bis vor wenigen Jahren gab dieses Simulationsergebnis Rätsel auf. Eine mögliche Erklärung für die geringe Masse des Mars wurde 2011 von einem Forscherteam um Alessandro Morbidelli vom Observatoire de la Côte d'Azur in Nizza mit dem „Grand Tack“-Modell gegeben.<sup>2</sup> Die Wissenschaftler nehmen an, dass die Gasplaneten vor den terrestrischen Planeten entstanden sind. In einem von Gas dominierten frühen Sonnensystem beginnen – was Computersimulationen bestätigt haben – die Riesenplaneten zu wandern. Dies könnte in unserem Sonnensystem folgendermaßen ausgesehen haben: Jupiter bewegt sich in Richtung Sonne, gefolgt von dem schnelleren Saturn. Sobald Saturn dem Jupiter nahekommt und sich beide Planeten in einer Umlaufresonanz befinden, kehrt sich die Richtung der Wanderung um. Beide Planeten beginnen nach außen in ihre heu-



■ Abb. 1: Der Meteorit Allende, der 1969 in Mexiko aufschlug, enthält weißliche Einschlüsse von Kalzium und Aluminium (Calcium-Aluminium Inclusions, CAIs). Diese Einschlüsse zählen zur ältesten festen Materie des Sonnensystems (wikimedia commons / James St. John / CC-BY-2.0).

■ Abb. 2: 3D-Illustration einer protoplanetaren Scheibe (sst).



## „Computersimulationen bieten wichtige Einblicke in die physikalischen Vorgänge, die bei der Entstehung der Erde eine Rolle gespielt haben.“

- 1 S. N. Raymond, T. Quinn, J. I. Lunine: High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus* (2006), 183, 265-282. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.03.011.
- 2 K. J. Walsh, A. Morbidelli, S. N. Raymond et al.: A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature* (2011), 475, 206-209. DOI: 10.1038/nature10201.
- 3 Dieses Modell, das mittlerweile durch hydrodynamische Simulationen bestätigt wurde, heißt deshalb auch „Grand-Tack-Modell“. „Tack“ bedeutet hier „Umkehr“ oder „Wende“.
- 4 S. A. Jacobson, A. Morbidelli, S. N. Raymond et al.: Highly siderophile elements in Earth's mantle as a clock for the Moon-forming impact. *Nature* (2014), 508, 84-87. DOI: 10.1038/nature13172.

ge Position zu wandern (Abb. 3).<sup>3</sup> Jupiter könnte sich diesem Modell zufolge der Sonne bis auf 1 Astronomische Einheit (AE) genähert haben. Dies ist eine Distanz, die dem heutigen Abstand der Erde zur Sonne entspricht. In diesem Abstand zur Sonne würde der Jupiter Materie „aufgesogen“ haben. In Simulationen entsteht dann aus dem übriggebliebenen Material ein kleinerer Planet, etwa so groß wie der Mars. Computersimulationen bieten also wichtige Einblicke in die physikalischen Vorgänge, die bei der Entstehung der Erde eine Rolle gespielt haben.

### Die Differenzierung der Erde in Erdkern und Erdmantel

Die Erde hat einen Radius von 6.371 Kilometern. In ihrem Zentrum befindet sich der aus Eisen und Ni-

ckel bestehende Erdkern mit einem Radius von 3.484 Kilometern. Er macht 17 Prozent des Volumens und 32 Prozent der Masse unseres Planeten aus. Der Erdkern ist bis auf einen kleinen festen inneren Kern flüssig. Er wird von einem Silikatmantel umgeben. Darüber liegt die 5 bis 70 Kilometer dicke Erdkruste. Merkur, Venus und Mars haben ähnliche Strukturen, wobei sich allerdings die Proportionen von Kern und Mantel erheblich unterscheiden. Bei allen vier terrestrischen Planeten hat sich der Kern während und nach der Akkretion vom Silikatmantel getrennt. Dieser Prozess muss unter hohen Temperaturen von bis zu 4.000 Grad Celsius stattgefunden haben, weil eine solche Separation nur in geschmolzenem Zustand möglich ist und sich die Schmelztemperatur mit zunehmender Tiefe stark erhöht.

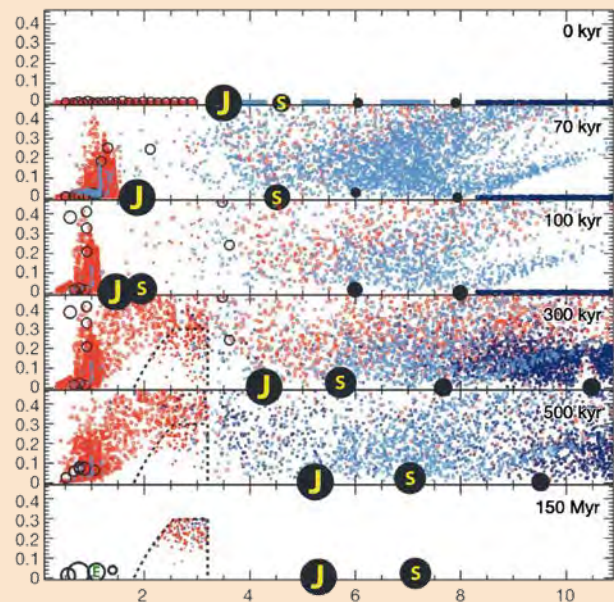
Aber wie konnten die Temperaturen im Erdinneren so hohe Werte erreichen? Computersimulationen zeigen, dass es während der Akkretion einige Rieseneinschläge (giant impacts) von Planetenembryos auf die wachsende Erde gegeben hat (Abb. 4). Da diese Kollisionen bei extrem hohen Geschwindigkeiten von 10 bis 20 Kilometern pro Sekunde stattfanden, wurden enorme Energien freigesetzt, die zu einer teilweisen

## Die Entstehung der Erde in der Computersimulation

Die Grafik basiert auf einer Computersimulation und zeigt – vergleichbar den Standbildern aus einem Film – fünf ausgewählte Stadien in der Entwicklung des Sonnensystems. Die x-Achse gibt jeweils die Entfernung von der Sonne in AE (Astronomischen Einheiten) an. Der linke Rand markiert die Position der Sonne, der rechte Rand eine Entfernung von 12 Astronomischen Einheiten. An der y-Achse der sechs Abbildungen ist jeweils die Exzentrizität angegeben. Dies ist die Abweichung der Himmelskörper von einer Kreisbahn um die Sonne:  $y=0$  bedeutet eine Kreisbahn; je höher der Wert  $>0$ , desto mehr weicht ein Himmelskörper von der Kreisbahn ab.

Der obere Abschnitt zeigt die Ausgangsvoraussetzungen der Simulation (= 0 Jahre): Hier sind Jupiter (J) und Saturn (S) bereits entstanden, ebenso Uranus und Neptun. Zudem wird angenommen, dass diese Planeten sowie alle Planetoiden und Planetenembryos die Sonne ursprünglich kreisförmig umrunden. Die Exzentrizitäten sind alle Null. Die darunter liegenden Abschnitte zeigen das Stadium des Sonnensystems nach 70.000 Jahren (70 kyr), 100.000 Jahren (100 kyr) usw. Dabei entwickeln sich die kreisförmigen Umlaufbahnen vieler Planetoiden und Planetenembryos zu Ellipsen.

Die Simulation zeigt, wie Jupiter und Saturn zunächst ins Innere der Akkretionsscheibe gewandert sind, sich der Sonne bis auf 1 bis 1,5 AE genähert haben und dann wieder nach außen gewandert sind. Eine große Zahl kleinerer Himmelskörper wurde dabei von ihnen „aufgesogen“. Nach 150 Millionen Jahren (150 Myr) hat das Sonnensystem in der Simulation ein Stadium erreicht, in dem es so aussieht wie das heutige Sonnensystem: Die vier Gesteinsplaneten – darunter die Erde (E) – sind entstanden und haben nicht länger den Status von Planetenembryos. Kleine Himmelskörper mit der Größe von Planetoiden existieren nur noch im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter, der in der Simulation bereits nach 300.000 Jahren erkennbar ist.



■ Abb. 3: A. Morbidelli, zuerst veröffentlicht in *Nature* (2011), 475, 206-209, siehe Anmerkung 2; bearbeitet von C. Göppner.



Aufschmelzung im Erdinneren führten. Es bildeten sich globale heiße Magmaozeane, die bis zu 2.500 Kilometern tief ins Erdinnere reichten. Flüssiges Eisen und geringe Mengen von anderen Metallen wie Nickel und Kobalt trennten sich von flüssigem Silikat, sanken aufgrund ihrer hohen Dichte nach unten und bildeten schließlich den Erdkern.

Früher glaubte man, dass die Kernbildung ein einziger globaler Prozess in einem flüssigen Ur-Ozean war. Heute wissen wir, dass es sich um einen vielstufigen Prozess handelte, bei dem die Akkretion eine wichtige Rolle spielte. Denn die auf der Erde einschlagenden Planetenembryos und Planetoiden enthielten ihrerseits sowohl Metalle als auch Silikate. In vielen Fällen waren die einschlagenden Himmelskörper bereits in Kern und Mantel differenziert, und der metallische Kern hat sich dann sofort mit dem Erdkern verbunden. Jeder Einschlag eines solchen Himmelskörpers auf die Erde lieferte Metalle und Silikate und muss als eine Episode in der Entstehung der Erde gesehen werden.

Die chemische Zusammensetzung des Erdmantels ist durch Analysen von Gesteinen des Erdmantels, die durch tektonische Prozesse an die Erdoberfläche gelangten, gut bekannt. Unter der Annahme, dass die Häufigkeiten der Elemente in der Erde ungefähr ihren Häufigkeiten in der Sonne entsprechen, kann man die chemische Zusammensetzung des Erdkerns errechnen und so Elementverteilungen zwischen Mantel und Kern angeben. Es gibt dabei zwei wichtige Elementgruppen:

- **Lithophile (= Gestein-liebende) Elemente:** Silizium, Magnesium, Kalzium und zahlreiche Spurenelemente bevorzugen die Silikatphase. Sie sind als Oxide (Siliziumdioxid, Magnesiumoxid etc.) in der Silikatschmelze gelöst. Aus der Silikatschmelze des Magmaozeans bilden sich nach der Abkühlung die Gesteine des Erdmantels.
- **Siderophile (= Eisen-liebende) Elemente:** Nickel, Kobalt, Wolfram und eine Reihe anderer Spurenelemente bevorzugen dagegen die Metallphase. Sie sind als Metalle im Erdkern enthalten. Der Erdmantel weist nur geringe Mengen siderophiler Elemente auf.

Die Trennung von siderophilen und lithophilen Elementen sowie die Extraktion siderophiler Elemente in den Erdkern haben internationale Forschergruppen – insbesondere auch am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth – durch Hochdruckexperimente und thermodynamische Modelle bestimmt.

## Die Entstehung des Mondes

Wie alt ist der Mond? Ein internationales Forschungsteam unter der Leitung von Prof. Dr. David Rubie ist durch Computersimulationen zu dem Ergebnis gekommen, dass er frühestens 63 Millionen Jahre und spätestens 127 Millionen Jahre nach der Bildung der ersten festen Materie des Sonnensystems entstanden sein kann.<sup>4</sup> Ein planetarer Körper – ungefähr von der Größe des Mars – ist mit der Protoerde kollidiert. Bei dem Einschlag wurden riesige Wolken von Staub und Gesteinsbrocken in die Erdumlaufbahn geschleudert, aus denen schließlich der Mond entstand.

■ Abb. 4: NASA/Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.



Es geht dabei im Wesentlichen um die Verteilung von Spurenelementen zwischen Metall- und Silikatschmelze bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen. Wenn man die Ergebnisse mit der tatsächlichen Elementverteilung zwischen Kern und Mantel vergleicht, lassen sich Rückschlüsse auf die Druck- und Temperaturverhältnisse ziehen, die im Inneren der Erde während der Akkretion geherrscht haben.

## Neue Forschungsperspektiven

Im EU-Projekt ACCRETE wurden am Bayerischen Geoinstitut (BGI) neuartige Modelle der Erdentstehung entwickelt. Zum ersten Mal werden in diesen Modellen das Wachstum der Erde und die Differenzierung von Erdkern und Erdmantel miteinander verknüpft. Die Modellrechnungen und die in Bayreuth durchgeführten Experimente lassen wichtige Rückschlüsse auf Prozesse im frühen Sonnensystem zu. So kann man beispielsweise aus Daten zur chemischen Zusammensetzung von Planetenembryos und Planetoiden zeigen, dass es im frühen Sonnensystem einen starken Oxidationsgradienten gegeben haben muss. Festkörper nahe der Sonne waren mangels Sauerstoff reduziert, das in ihnen enthaltene Eisen war als Metall (Fe) vorhanden. Festkörper hingegen, die mehrere AE von der Sonne entfernt entstanden sind, enthielten Eisen im oxidierten Zustand (FeO). Berechnungen der Reduktions-/Oxidationsverhältnisse, die während der Akkretion der Erde vorgelegen haben, erlauben weitere neue Einblicke in die Geschichte der Erdentstehung.

## AUTOR



■ Prof. Dr. David Rubie ist Professor am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth und Leiter des Projekts ACCRETE (Accretion and Early Differentiation of the Earth and Terrestrial Planets). Für dieses Projekt wurde er 2012 vom Europäischen Forschungsrat (ERC) mit einem Advanced Grant ausgezeichnet.

## LITERATURTIPP

D. C. Rubie, V. Laurenz, S. A. Jacobson et al.: Highly siderophile elements were stripped from Earth's mantle by iron sulfide segregation. *Science* (2016), 353, 1141-1144. DOI: 10.1126/science.aaf6919.



# Dynamik der Erde

Geoforschung und Materialwissenschaft erkunden unseren Planeten

■ Großes Bild: Das Gebäude des Bayerischen Geoinstituts (BGI) und des Labors für Kristallographie auf dem Bayreuther Campus (Foto: Universität Bayreuth).  
Kleines Bild: Strukturmodell eines im BGI erstmals synthetisierten Eisen-Bridgmanits. Kein anderes Mineral kommt in der Erde so häufig vor wie Bridgmanit.  
Es handelt sich um einen Silikat-Perowskit, der Eisen und Aluminium enthält und insgesamt ein Drittel des Volumens unseres Planeten füllt (Grafik: Leyla Ismailova).

# Erdbeben in der Tiefe

Die tektonischen Platten, die von der Erdkruste bis hinab in den oberen Erdmantel reichen und sich über die gesamte Erdoberfläche verteilen, sind in ständiger Bewegung. Aufgrund von Unterschieden in den Bewegungen benachbarter Platten können sich hohe mechanische Spannungen an den Plattengrenzen aufbauen. Erdbeben treten auf, wenn diese Spannungen plötzlich abgebaut werden. So kommt es rund um den Pazifischen Ozean nicht selten vor, dass sich zwei Platten aufeinander zubewegen, bis sich die eine unter die andere schiebt und in den Erdmantel abtaucht. Dieser Prozess, der als Subduktion bezeichnet wird, ist eine wesentliche Ursache für Erdbeben.

Erdbeben können durch plötzlichen Spannungsabbau auch entstehen, wenn angrenzende Platten sich horizontal in entgegengesetzter Richtung aneinander vorbeischieben. Dies geschieht beispielsweise an der berühmten San-Andreas-Störung an der Westküste Amerikas. Unebenheiten und Spannungen führen dazu, dass die felsigen Platten nicht reibungslos aneinander entlanggleiten, sondern sich an ihren Oberflächen ineinander verkeilen. Erst wenn sich durch die fortschreitende Bewegung mindestens einer Platte starker Druck aufgestaut hat, lösen sich die Oberflächen abrupt voneinander und können so ein Beben auslösen. GPS-Sensoren machen es heute möglich, solche Plattenbewegungen – oder deren Fehlen – aufzuzeichnen. Die Messungen können weltweit hilfreich sein, wenn man Regionen identifizieren will, wo sich Spannung aufbaut und die Wahrscheinlichkeit eines Erdbebens in den kommenden Jahren besonders hoch ist. Allerdings bleibt es schwierig, alle Risiken zu erfassen. Die Tsunamis auf Sumatra (2004) und in Tohoku/Japan (2011) haben schwerste Zerstörungen angerichtet und wurden durch Erdbeben in Regionen ausgelöst, die man überhaupt nicht als Hochrisikogebiete angesehen hatte. Risiken aufgrund von Ereignissen zu identifizieren, die einmal in tausend Jahren eintreten können, ist nahezu unmöglich.

In einigen Fällen befindet sich der Ursprung (Hypozentrum) von Erdbeben mehrere hundert Kilometer unter der Erdoberfläche. Weil Drücke und Temperaturen mit zunehmender Tiefe erheblich ansteigen, sollte man erwarten, dass Gestein im tiefen Erdinneren formbarer und weniger widerstandsfähig ist.

Es sollte sich den hohen Drücken anpassen, indem es sich faltet oder zerfließt – mit der Folge, dass sich keine Spannung aufbauen kann, die später zu Erdbeben führt. Umso rätselhafter ist es, dass die Subduktion tektonischer Platten in Tiefen bis zu 700 Kilometern sogar sehr starke Beben verursacht. Und ebenso hat die Forschung noch keine Antwort auf die Frage gefunden, weshalb es in noch größeren Tiefen keine Erdbeben gibt, obwohl tektonische Platten noch tiefer als 700 Kilometer sinken.

Derzeit wird der folgende Erklärungsansatz diskutiert: In einer Subduktionszone sinkt die Kruste, die seit Jahrmillionen den Meeresboden bildet, ins Erdinnere ab. In dieser Kruste haben sich Minerale gebildet, die in ihren Strukturen Wasser enthalten. Wenn nun wasserhaltige Mineralien infolge von Subduktion immer tiefer sinken und dadurch steigenden Drücken und Temperaturen ausgesetzt sind, wird ein Punkt erreicht, an dem sie kollabieren und Wasser freigesetzt wird. Unter hohem Druck sollte Gestein eigentlich nicht zerbrechen. Doch wenn Wasser freigesetzt wird, können – so die Hypothese – durch den entstehenden Überdruck Risse entstehen, die ein bruchhaftes Verhalten und damit ein Erdbeben auslösen. Mit Technologien der Hochdruckforschung, wie sie im BGI eingesetzt werden, kann man überprüfen, wie wasserhaltige Minerale in einer Tiefe von 700 Kilometern tatsächlich auf sehr hohe Drücke reagieren. Dann wird sich zeigen, wie plausibel es ist, Erdbeben in großer Tiefe auf diese Weise zu erklären. Falls sich die Hypothese bewährt, könnte es einen Zusammenhang zwischen Erdbeben und Wasserbewegungen im tiefen Erdinneren geben, die möglicherweise eine wichtige Rolle für die Plattentektonik spielen. In dieser Frage steht die Forschung aber noch am Anfang.

## AUTOR



■ Prof. Dr. Daniel J. Frost ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentelle Geowissenschaften am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth. 2016 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).



■ Abb. 1: Radaraufnahme der San-Andreas-Störung bei San Mateo in Kalifornien (Foto: NASA Jet Propulsion Laboratory / wikimedia commons / PD).

■ Tomo Katsura

# Elektrisch leitfähig: der Erdmantel

AUTOR



■ Prof. Dr. Tomo Katsura ist Inhaber des Lehrstuhls für Struktur und Dynamik der Erdmaterie am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth. Für ein Projekt zum Materialtransport im Erdmantel wurde er vom Europäischen Forschungsrat mit einem ERC Advanced Grant ausgezeichnet.



■ Abb. 1: Blick vom Mt. Chibusa auf Hahajima, einer der Bonin-Inseln in Japan (sst).

■ Abb. 2: Die Profile der Leitfähigkeit des Erdmantels, die im Osten der Izu-Bonin-Inseln (IBI) und vor den nordöstlichen Küsten Japans (NOJ) gemessen wurden, unterscheiden sich deutlich von der Leitfähigkeit des Peridotit, des hauptsächlichen Bestandteils des Erdmantels – sowohl mit hohem (violett) als auch mit geringem (grün) Wasser- und Kohlendioxidgehalt (Grafik: Tomo Katsura).

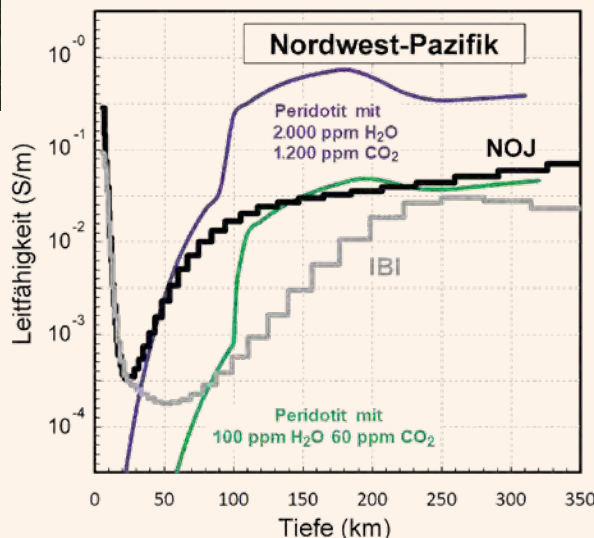
Elektrische Leitfähigkeit ist eine der physikalischen Eigenschaften des Erdinneren, die von der Erdoberfläche aus gemessen, zumindest aber grob geschätzt werden können. Während elastische Eigenschaften in allen Bereichen des Erdinneren ungefähr gleichmäßig ausgeprägt sind, schwankt die elektrische Leitfähigkeit ganz erheblich. So besitzen Schmelzen und Fluide eine Leitfähigkeit, die um Größenordnungen höher ist als die von silikathaltigen Mineralien. Daher können Untersuchungen des Erdmantels, die speziell auf seine elektrische Leitfähigkeit ausgerichtet sind, Erkenntnisse über seine innere Zusammensetzung liefern, die man allein mit seismischen Verfahren – die sich auf die Elastizität und Dichte des Erdmantels beschränken – nicht gewinnen könnte.

Ozeanische Erdkruste entsteht entlang von vulkanisch aktiven Gebirgsketten in mittelozeanischen Rücken (*Mid-Ocean-Ridges, MOR*). Sie bewegt sich mit einer relativ konstanten Geschwindigkeit von ihrer Entstehungsregion weg und legt dabei über Tausende von Kilometern zurück. Dabei nimmt sie die unmittelbar darunter liegenden harten Bereiche des Erdmantels mit. Die ozeanische Kruste enthält große Mengen von Basaltgestein, das durch Vulkanismus aus dem Erdmantel nach oben in die Kruste vorgezogen ist. Die chemische Zusammensetzung des Basalts ist ziemlich einheitlich, was ein starkes Indiz dafür ist, dass dies auch für die darunter liegenden

Bereiche des Erdmantels gilt, der hauptsächlich aus Peridotit besteht.

Vor diesem Hintergrund liegt die folgende Erwartung nahe: Wenn sich innerhalb des Erdmantels Unterschiede hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit feststellen lassen, sollten diese in Altersunterschieden der tektonischen Platten begründet sein. Denn mit zunehmendem Alter kühlt das Gestein ab, so dass die elektrische Leitfähigkeit sinkt. Doch geophysikalische Beobachtungen widersprechen dieser Erwartung. Ein Beispiel sind Messungen am Ostpazifischen Rücken (*East Pacific Rise, EPR*). An Punkten, die nur 150 Kilometer voneinander entfernt sind, sind Messungen der elektrischen Leitfähigkeit zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen gekommen. Auch unter sehr alten ozeanischen Platten im Nordwesten des Pazifik, die vor 130 bis 150 Millionen Jahren entstanden sind, hat man an benachbarten Stellen signifikante Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit festgestellt, die in „Siemens pro Meter (S/m)“ gemessen wird. So weist der Erdmantel im Osten der Izu-Bonin-Inseln in einer Tiefe von 60 Kilometern noch eine geringe Leitfähigkeit von weniger als 0,0002 S/m auf. Sie steigt mit zunehmender Tiefe erheblich an und erreicht den mehr als hundertfachen Wert von 0,03 S/m in einer Tiefe von 250 Kilometern. Andererseits zeigt der Erdmantel vor den nordöstlichen Küsten Japans eine ziemlich hohe Leitfähigkeit: Schon in einer Tiefe von 60 Kilometern erreicht sie 0,01 S/m, und in 250 Kilometer Tiefe beträgt sie 0,04 S/m. Die Leitfähigkeit in Tiefen zwischen 50 und 150 Kilometern unterscheidet sich in den beiden Regionen um Größenordnungen. Allein mit Unterschieden in der Leitfähigkeit von Peridotit lassen sich diese Diskrepanzen auf engem Raum nicht ausreichend erklären. Welche weiteren Faktoren dabei eine Rolle spielen, bleibt eine spannende Frage für die Forschung.

Bisher hat man angenommen, dass der ozeanische Mantel eine ziemlich einheitliche „normale“ Zusammensetzung aufweist. Doch die jüngsten Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit haben gezeigt, dass dies eine zu vereinfachte Sichtweise ist. Der ozeanische Mantel ist über mehrere hundert Kilometer sehr uneinheitlich strukturiert, obwohl sich hinsichtlich der geologischen Entstehungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede feststellen lassen.



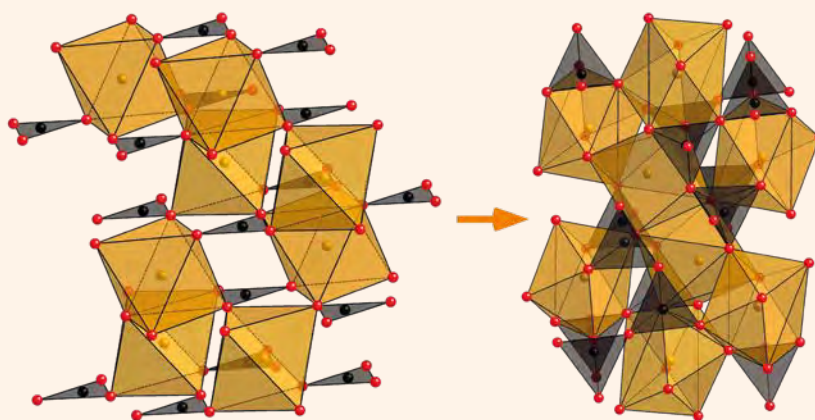
# Kohlenstoff in Bewegung

Wieviel Kohlenstoff enthält unser Planet? Aufgrund direkter Messungen wissen wir, dass die Atmosphäre rund 600 Milliarden Tonnen Kohlenstoff enthält. Dies ist aber wenig im Vergleich mit den bekannten Kohlenstoffmengen in den Ozeanen und den noch größeren Mengen im Felsgestein auf der Erdoberfläche. Aber wie groß ist die Kohlenstoffmenge in den uns unzugänglichen Bereichen des Erdinneren?

Vor kurzem hat ein Forschungsteam unter Beteiligung des Bayerischen Geoinstituts (BGI) und des MIT in Boston/USA das Rätsel gelöst, warum Schallwellen von Erdbeben unter alten Kontinentalplatten vergleichsweise hohe Geschwindigkeiten haben. Simulationen im Hochdrucklabor und am Computer ergaben, dass in einer Tiefe zwischen 100 und 150 Kilometern wahrscheinlich mehr als zehn Milliarden Tonnen Diamanten lagern. Diamant, das härteste natürliche Material, ist nichts anderes als eine Modifikation des Kohlenstoffs. Darüber hinaus gibt es starke Indizien dafür, dass der hauptsächlich aus Eisen bestehende Erdkern auch ein oder mehrere leichte Elemente enthält, und dafür kommt insbesondere Kohlenstoff infrage. Man nimmt an, dass diese leichten Bestandteile des Erdkerns die Hauptursache für das stabile Magnetfeld der Erde sind. Indirekte Messungen weisen also auf eine Kohlenstoffmenge im Erdinneren hin, die viele Hunderte oder Tausende Male größer ist als die Kohlenstoffmengen auf der Oberfläche.

Es ist allgemein bekannt, dass es auf der Erdoberfläche einen Kohlenstoff-Kreislauf gibt, an dem die Atmosphäre und die Ozeane ebenso beteiligt sind wie Felsgestein und die Gesamtheit der lebenden Organismen. Aber wer weiß schon, dass es auch einen tiefen Kohlenstoffkreislauf gibt, der sich von der Erdkruste bis zum Erdkern erstreckt? Diamanten zeugen davon, dass der Kohlenstoff nicht nur auf, sondern auch unter der Erdoberfläche ständig in Bewegung ist. Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings darin, dass Kohlenstoff in der Tiefe sehr viel langsamer vorankommt. Auf der Erdoberfläche kann man die Fortbewegung des Kohlenstoffs in Jahren messen, im Erdinneren jedoch vollzieht sie sich in Millionen oder Milliarden von Jahren. Hier wird der Kreislauf des Kohlenstoffs hauptsächlich von der Subduktion von Erdplatten angetrieben, die

Felsgestein in die Tiefe ziehen – und zwar mit einer Geschwindigkeit von einem Zentimeter pro Jahr. Auf seinem Weg ins Erdinnere schmilzt ein Teil dieses Gesteins. Das hat zur Folge, dass Kohlenstoff in Form eines Gases – zum Beispiel als  $\text{CO}_2$  – freigesetzt wird oder zu Diamanten kristallisiert. Die restlichen kohlenstoffhaltigen Minerale sinken noch tiefer hinab. Die Forschungstechnologien am BGI bieten Ein-



blicke in die Veränderungen, die kohlenstoffhaltige Minerale auf Ihrem Weg in die Tiefe durchlaufen. So hat ein Forscherteam Proben von Eisencarbonat ( $\text{FeCO}_3$ ) extremen Drücken und Temperaturen ausgesetzt, wie sie tief im Erdinneren herrschen. Röntgenuntersuchungen ergaben, dass die Kohlenstoffatome unter diesen Bedingungen neue kristalline Strukturen annehmen. Sie ordnen sich in Tetraedern an, die dem Eisencarbonat eine außergewöhnliche Stabilität verleihen. Die Kohlenstoffatome bleiben darin eingeschlossen, wenn das Mineral noch tiefer in den unteren Erdmantel absinkt. Infolge der Mantelkonvektion gelangt das kohlenstoffhaltige Material letztlich wieder zurück an die Oberfläche.

Der tiefe Kohlenstoff-Kreislauf der Erde könnte wesentlich dazu beigetragen haben, unseren Planeten bewohnbar zu machen. Denn er war in der Lage, die in der Atmosphäre enthaltene Kohlenstoffmenge und somit auch das Klima – insbesondere die Temperatur – durch viele Erdzeitalter hindurch zu stabilisieren. Kohlenstoff ist also nicht nur einer der wichtigsten Bausteine des Lebens. Seine Allgegenwart auf und in der Erde ist möglicherweise ein Grund dafür, dass wir heute auf ihr leben.



■ Abb. 1: Ein wenige Millimeter großer Diamantkristall auf Kimberlit-Gestein (Foto: Parent Géry / wikimedia commons / CC-BY-SA-3.0).

■ Abb. 2: Hochdruckforscher am BGI entdeckten äußerst stabile Strukturen im Eisencarbonat: An der Erdoberfläche sind Kohlenstoffatome (schwarz) und Sauerstoffatome (rot) in Dreiecken angeordnet, tief im Erdinneren gruppieren sie sich zu Tetraedern um (Grafik: Catherine McCammon).

## AUTORIN



■ PD Dr. Catherine McCammon ist Akademische Direktorin am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth.

■ Hans Kepler

# Der tiefe Stickstoff-Kreislauf der Erde

■ *Abb. 1: Bei den Messungen von Stickstoff in Proben von Hochdruckexperimenten kooperierte das Bayerische Geoinstitut (BGI) mit dem Labor für Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ in Potsdam. Das Foto zeigt das Cameca 1280-HR Massenspektrometer, das für die Messungen verwendet wurde. Um Stickstoff in den Proben von Kontamination durch Luft unterscheiden zu können, wurden die Hochdruckexperimente mit dem seltenen Isotop  $^{15}\text{N}$  ausgeführt (Foto: GFZ).*



Die Zusammensetzung der Atmosphäre hat sich im Laufe der Erdgeschichte kontinuierlich verändert. Hinweise auf derartige Veränderungen sind seit langem bekannt. Die Goldvorkommen von Witwatersrand in Südafrika wurden 1883 entdeckt. Bis heute stammt etwa die Hälfte des gesamten weltweit produzierten Goldes aus diesen Lagerstätten. Geologisch sind die Lagerstätten an Flusssedimente gebunden, die fast drei Milliarden Jahre alt sind. In diesen Sedimenten findet man gelegentlich abgerundete Körner von Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ). Unter heutigen Bedingungen würde Pyrit sehr schnell mit Wasser

der Gesamtdruck der Atmosphäre – über Milliarden von Jahren praktisch konstant geblieben ist. Mittlerweile gibt es aber zahlreiche Hinweise darauf, dass dies nicht der Fall ist. Bestimmte Bakterien im Meer können den im Wasser gelösten Stickstoff der Luft verarbeiten und für andere Organismen biologisch verwertbar machen. Bei der Zersetzung von organischem Material bilden sich im Meer Ammonium-Ionen, die in die ozeanische Erdkruste eingebaut werden können. In Subduktionszonen, beispielsweise am Rande des Pazifik, tauchen Platten von ozeanischer Kruste wieder in den Mantel ein. Detaillierte Untersuchungen zeigen, dass auf diese Weise etwa drei bis zehn Mal mehr Stickstoff von der Erdoberfläche entfernt wird, als andererseits durch vulkanische Gase aus dem Erdinneren wieder freigesetzt wird. Dies ist ein klarer Hinweis darauf, dass es zwischen der Atmosphäre und dem Erdmantel einen dynamischen Austausch von Stickstoff gibt und dass der Gesamtdruck der Atmosphäre in der Erdgeschichte wahrscheinlich stark geschwankt hat.

Wieviel Stickstoff enthält der Erdmantel? Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten, denn elementarer Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) ist ein Gas. Fast alle Proben aus dem Erdmantel wurden durch Vulkaneruptionen an die Erdoberfläche transportiert und dadurch hohen Temperaturen ausgesetzt, so dass sie Stickstoff verloren haben. Französische Geochemiker haben allerdings schon vor Jahren eine interessante Beobachtung gemacht: Die absolute Menge von Stickstoff in Mantelproben kann sehr unterschiedlich sein – das Verhältnis von Stickstoff zu dem Argon-Isotop  $^{40}\text{Ar}$  ist jedoch fast immer konstant, denn Stickstoff und Argon verhalten sich bei der Entgasung offenbar ähnlich.  $^{40}\text{Ar}$  wiederum ist ein radioaktives Zerfallsprodukt des Kalium-Isotops  $^{40}\text{K}$ , und die Menge an Kalium im Mantel kennt man sehr genau. Man weiß daher auch, wieviel  $^{40}\text{Ar}$  im Laufe der Erdgeschichte gebildet worden sein muss. Aus dem konstanten Verhältnis von Stickstoff zu  $^{40}\text{Ar}$  lässt sich dann die Menge an Stickstoff im Mantel abschätzen. Man erhält so eine mittlere Konzentration von 1 ppm oder 0,0001 Gewichtsprozent. Dies ist scheinbar eine verschwindend kleine Zahl, aber multipliziert mit der enormen Masse des Erdmantels entspricht sie der Masse der gesamten Atmosphäre. Berücksichtigt man wenige Proben mit anomal hohen Stickstoff/ $^{40}\text{Ar}$ -Verhältnissen, könnten es auch bis zu 10 Atmosphären-Massen sein.

und Luftsauerstoff zu Eisenhydroxid verwittern. Vor drei Milliarden Jahren, im Proterozoikum, war er aber wegen des geringeren Sauerstoffgehalts der Atmosphäre offenbar stabil. Mittlerweile kann man aus zahlreichen weiteren Beobachtungen sehr gut rekonstruieren, wie sich der Sauerstoffgehalt entwickelt hat. Im Oberkarbon, vor etwa 300 Millionen Jahren, muss er sogar wesentlich höher gewesen sein als heute. Man kennt aus dieser Zeit fossile Insekten, gigantische Libellen mit fast einem Meter Flügelspannweite, die in einer Atmosphäre mit dem heutigen Sauerstoffgehalt nicht überleben könnten.

Was ist aber mit dem Stickstoff, dem Hauptbestandteil der Luft? Lange hat man geglaubt, dass die Menge an Stickstoff in der Luft – und damit auch

Wie wird der Stickstoff im Erdmantel gespeichert? Diese „tiefe Geochemie des Stickstoffs“ hat eine Arbeitsgruppe am BGI der Universität Bayreuth intensiv erforscht. Hier wurde unter anderem die Löslichkeit von Stickstoff in den Mineralen des Erdmantels unter hohem Druck gemessen. Die dabei untersuchten Proben waren zuvor im Labor hergestellt worden. Die Messung sehr geringer Konzentrationen von Stickstoff in mikroskopisch kleinen Silikatproben stellte eine enorme technische Herausforderung dar, die aber in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz Zentrum Potsdam (GFZ) gelöst wurde. Wie sich herausstellte, ist Stickstoff in den Silikaten des Erdmantels erstaunlich gut löslich, mit maximalen Konzentrationen bis zu mehreren 100 ppm. Insbesondere zeigen die Messungen, dass Stickstoff wahrscheinlich in der Übergangszone des Erdmantels – also in einer Tiefe zwischen 410 und 660 Kilometern – angereichert ist. Dieser Befund stimmt mit der Beobachtung anomal hoher  $N_2/^{40}Ar$ -Verhältnisse in Mantel-Proben aus großer Tiefe überein. Die Daten geben auch darüber Aufschluss, wieviel Stickstoff in der Frühgeschichte der Erde im Mantel gelöst worden sein muss. Der durch Datenmodellierung gewonnene Wert liegt im Bereich von mehreren Atmosphären-Massen und ist damit durchaus konsistent mit den Messungen an natürlichen Proben.

Wie sahen die Umweltbedingungen auf der frühen Erde aus, als vor mehr als vier Milliarden Jahren wahrscheinlich die ersten Biomoleküle entstanden?

Bei der Rekonstruktion dieser Bedingungen sind die Geowissenschaften weitgehend auf geodynamische Modelle und experimentelle Simulationen angewiesen, denn Gesteinsproben sind aus diesem Abschnitt der Erdgeschichte praktisch nicht überliefert. In vulkanischen Gasen findet man Stickstoff heute als  $N_2$ . In der frühesten Erdgeschichte könnte dies aber anders gewesen sein, denn vor über vier Milliarden Jahren war der obere Mantel wahrscheinlich noch viel sauerstoffärmer – und damit viel stärker reduzierend – als heute. In einer Serie von Hochdruckexperimenten am BGI stellte sich heraus, dass unter diesen Bedingungen Stickstoff aus dem Mantel nicht als  $N_2$ , sondern als Ammoniak ( $NH_3$ ) freigesetzt wurde. Aufgrund thermodynamischer Daten lässt sich ausschließen, dass die Ammoniakmoleküle in der Atmosphäre stabil geblieben sind. Aber ein ständiger „Nachschub“ aus dem Erdmantel könnte in der frühen Erdgeschichte eine ammoniakhaltige Atmosphäre aufrechterhalten haben, in der sich Aminosäuren und andere organische Moleküle unter Einwirkung von Ultraviolettstrahlung oder elektrischen Entladungen (Blitzen) herausgebildet haben. Gleichzeitig hat das Ammoniak in der Atmosphäre möglicherweise einen so starken Treibhauseffekt ausgelöst, dass die Temperatur der Erdoberfläche über den Gefrierpunkt angestiegen ist – obwohl die Sonnenstrahlung vor vier Milliarden Jahren deutlich geringer war als heute. Die Entgasung von Ammoniak aus dem Mantel könnte daher wesentlich dazu beigetragen haben, dass die Erde zu einem bewohnbaren Planeten wurde.

## AUTOR



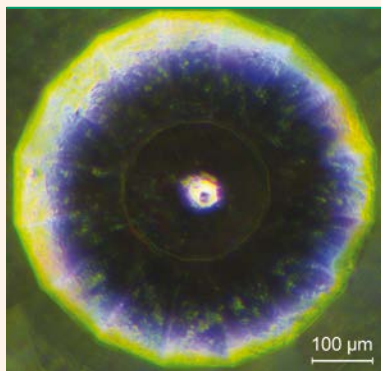
■ Prof. Dr. Hans Keppler ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentelle Geophysik am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth. 2001 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).



■ Abb. 2: Die Eruption des Vulkans Mauna Ulu auf Hawaii im Jahr 1969. Sowohl das Wasser der Ozeane als auch der Stickstoff in der Atmosphäre stammen letztlich aus der Entgasung solcher basaltischen Magmen (Abbildung mit freundlicher Genehmigung des U.S. Geological Survey / Foto von Jim Jacobi).

■ Leonid Dubrovinsky

# Von der Geoforschung zu Hightech-Materialien



■ Abb. 1: Blick ins Innere einer Diamantstempelzelle (Foto: Leonid Dubrovinsky).

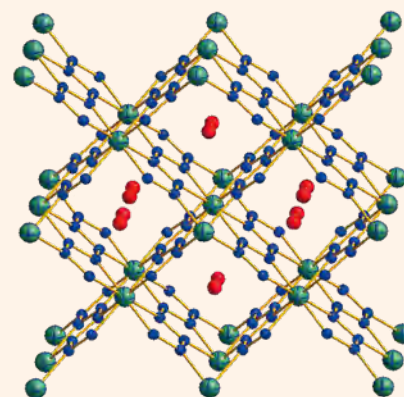
Den Eigenschaften, Verhaltensweisen und Strukturen der Materie im Inneren der Erde und anderer Planeten auf den Grund zu gehen, ist das Ziel der geowissenschaftlichen Hochdruckforschung. Ausgehend von Methoden der Kristallchemie untersucht sie die Prinzipien, nach denen sich Atome in Kristallen unter hohen Drücken und Temperaturen anordnen. Insbesondere befasst sie sich mit den Regelmäßigkeiten in den Strukturen von Silikaten, Oxiden, Karbonaten und weiteren Verbindungen, die am Aufbau und an der Dynamik der Erde wesentlich beteiligt sind. Häufig geht es um die Frage, wie sich Kristallstrukturen auf grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften der Materialien auswirken. Ein zentrales Instrument dieser Forschungsarbeiten sind Diamantstempelzellen (*Diamond Anvil Cells, DAC*). Darin wird eine winzige Materialprobe zwischen den Köpfen zweier Diamanten eingequetscht, die einen äußerst hohen Kompressionsdruck ausüben. Zeitgleich erzeugte Röntgenbeugungsmuster ermöglichen Einblicke in die Strukturen des jeweiligen Materials.

Diese Technologie hat in den letzten zehn Jahren unter maßgeblicher Mitwirkung der Universität Bayreuth geradezu revolutionäre Fortschritte gemacht. So wurde nachgewiesen, dass die Strukturen von Einkristallen bei einem Kompressionsdruck von einigen Megabar erhalten bleiben, wenn ein Inertgas als Druckmedium verwendet wird. Zudem wurden neuartige, für röntgenkristallographische Untersuchungen besonders vorteilhafte Diamantstempelzellen entwickelt. Ein tragbarer Laserheizer ermöglicht heute Beugungsexperimente an Einkristallen bei Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius. All diese Fortschritte haben überraschende Entdeckungen und Entwicklungen ermöglicht, wie die folgenden Beispiele zeigen:

■ Einem internationalen Team unter Leitung von Bayreuther Hochdruckforschern ist es vor wenigen Jahren gelungen, auf der Basis theoretischer Berechnungen einen völlig neuen Supraleiter herzustellen. Der extrem harte Eisenborid ( $\text{FeB}_4$ ) hat eine in der Natur unbekannte Kristallstruktur. Die Hochdruck-Synthese solcher Materialien kann ein interessanter Ansatzpunkt für die Entwicklung neuer nano- und mikroelektromechanischer Systeme sein.

■ Kürzlich wurden in Bayreuth unter hohen Drücken Eisenoxide synthetisiert, die außergewöhnliche Kristallstrukturen und faszinierende physikalische Eigenschaften aufweisen, unter anderem  $\text{Fe}_4\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_5\text{O}_6$ ,  $\text{Fe}_7\text{O}_9$ ,  $\text{Fe}_5\text{O}_7$ ,  $\text{Fe}_{25}\text{O}_{32}$  und  $\text{FeO}_2$ . Schon heute wird immer deutlicher, dass die reiche Chemie der Eisenoxide wesentlich zum Sauerstoffkreislauf in der festen Erde beiträgt. Sie könnte überdies eine wichtige, bisher vernachlässigte Rolle in Umweltprozessen spielen. Außerdem existieren einige dieser neuen Verbindungen auch unter Normalbedingungen. Künftige Forschungsarbeiten werden zeigen, wie die neuen Eisenoxide als magnetische Materialien oder chemische Katalysatoren angewendet werden können.

■ Übergangsmetallnitride zeichnen sich oft durch eine außergewöhnliche Härte, hohe Schmelzpunkte sowie eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit aus. Jetzt haben Forscher der Universität Bayreuth den ersten bekannten Polynitrid hergestellt. Es handelt sich um eine komplexe Verbindung, deren Polymerketten nur aus Stickstoffatomen bestehen. Die chemische Summenformel lautet  $\text{ReN}_8 \cdot x\text{N}_2$ . Obwohl bei der Synthese ein sehr hoher Kompressionsdruck von rund 100 Gigapascal eingesetzt wurde, hat der neue Polynitrid keine besonders „dichte“ Struktur. Vielmehr enthält er Kanäle, in denen sich  $\text{N}_2$ -Moleküle befinden – was sehr ungewöhnlich ist. Derart stickstoffreiche Polynitride besitzen eine hohe Energiedichte und könnten für künftige Systeme der Energiespeicherung und Energieübertragung wegweisend sein: ein weiteres Beispiel dafür, wie die Hochdruckforschung am wissenschaftlich-technischen Fortschritt mitwirkt.



## AUTOR



■ Prof. Dr. Dr. h.c. Leonid Dubrovinsky ist Akademischer Direktor am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth.

■ Abb. 2: Die Struktur des neuen Polynitrids  $\text{ReN}_8 \cdot x\text{N}_2$ . Grün: Rheniumatome; blau: Stickstoffatome, die Polymerketten bilden; rot: Stickstoffmoleküle ( $\text{N}_2$ ), die sich in den Kanälen der Struktur befinden (Grafik: Leonid Dubrovinsky).



# Atomare Strukturen im Röntgenlicht

Elektronen-Synchrotronanlagen, Freie-Elektronen-Laser, Neutronenreaktoren sowie weitere Zentren, für die sich die Bezeichnung „Großforschungseinrichtungen“ (*large scale facilities*) etabliert hat, haben heute eine Schlüsselrolle in der wissenschaftlich-technischen Forschung. Als Quellen intensiver Photonen-, Neutronen- und Ionenstrahlen ermöglichen sie leistungsstarke Forschungstechniken auf den Gebieten der Beugung und der Spektroskopie. Elektronen-Synchrotronanlagen erzeugen Röntgenstrahlen, die hundert Milliarden Mal brillanter sind als die Röntgenstrahlen, die für medizinische Diagnosen genutzt werden. Neben ihrer Brillanz, hohen Intensität und engen Bündelung hat Synchrotronstrahlung weitere für die Forschung wichtige Eigenschaften, zum Beispiel eine wechselnde Intensität in definierten zeitlichen Abständen (die Strahlung ist gepulst) und eine definierte Schwingungsrichtung (die Strahlung ist polarisiert). Sie eignet sich daher hervorragend, um Materialstrukturen bis ins kleinste Detail, sogar auf der atomaren Ebene, zu erforschen. Ein Synchrotron funktioniert wie ein großes Mikroskop, das die Position und Bewegung von Atomen in kondensierter und lebender Materie „filmt“.

Diese Technologie ist daher von größtem Interesse, wenn man die Dynamik der Erde und anderer Planeten verstehen will. Auch für die Chemie, Materialphysik, Archäologie, Strukturbiologie und Umweltforschung sowie die Computerwissenschaften bietet sie einzigartige Vorteile. Geo- und Materialforscher in Bayreuth untersuchen seit vielen Jahren die Prozesse, die unter extremen Bedingungen – insbesondere sehr hohen Temperaturen und Drücken oder starken magnetischen Feldern – in kleinsten Materialproben ablaufen. In strukturellen Änderungen, die sich dabei vollziehen, können sie extrem schnelle chemische Reaktionen oder plötzliche Änderungen physikalischer Eigenschaften ablesen. Bei diesen Forschungsarbeiten kooperieren Bayreuther Wissenschaftler mit der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble, der Röntgenstrahlungsquelle PETRA III des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg und der Advanced Photon Source (APS) des Argonne National Laboratory in Chicago.

Damit hochbrillante Röntgenstrahlen für Experimente unter sehr hohen Drücken und Temperaturen genutzt werden können, müssen die Materialproben

in eine technische Umgebung eingefügt werden, die diese extremen Bedingungen hervorbringt. Die Bayreuther Forscher haben dafür einen tragbaren Laserheizer und ein darauf abgestimmtes Untersuchungsverfahren entwickelt. Die in Diamantstempelzellen eingequetschten Materialproben können jetzt beidseitig erhitzt werden, während sie gleichzeitig den Röntgenstrahlen ausgesetzt sind. So kann man Materialstrukturen unter Drücken, die 1,5 Millionen Mal höher sind als der Druck der Erdatmosphäre, und bei Temperaturen von mehreren Tausend Grad Celsius analysieren. Die Synchrotron-Anlagen in Grenoble, Hamburg und Chicago haben diese Techniken mittlerweile integriert.

An den Kooperationen der Universität Bayreuth mit diesen Großforschungseinrichtungen nehmen auch viele engagierte Nachwuchswissenschaftler teil. In Bayreuth erwerben sie zunächst ein breit angelegtes wissenschaftliches Verständnis der Hochdruckforschung und der physikalischen Prinzipien, unter denen sich technisch anspruchsvolle Experimente realisieren lassen. Dieses Wissen bringen sie zu internationalen Synchrotron-Anlagen, wo sie willkommenen Forschungspartner sind. Wenn sie ihre Experimente abgeschlossen und dabei eigene Forschungsideen umgesetzt haben, kehren sie gern nach Bayreuth zurück, um ihr Know-how einer neuen Generation von Master-Studierenden und Doktoranden zu vermitteln. Beispiele einer solchen Zusammenarbeit sind Dr. Konstantin Glazyrin, der an der Universität Bayreuth promoviert hat, und Dr. Anna Pakhomova, eine frühere Postdoktorandin am BGI. Beide sind heute Mitarbeiter der DESY und haben zugleich in Bayreuth mit ihren Habilitationsprojekten zur Kristallographie begonnen. So weitet sich das Netzwerk der Bayreuther Hochdruckforschung stetig aus.

## AUTORIN



■ Prof. Dr. Dr. h.c. Natalia Dubrovinskaia ist Professorin für Materialphysik und Technologie bei extremen Bedingungen am Labor für Kristallographie der Universität Bayreuth.

■ Abb. 1: Dr. Anna Pakhomova und Dr. Konstantin Glazyrin installieren einen Laserheizer an einer Beamline der Röntgenstrahlungsquelle PETRA III des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY). Ihre Habilitationen an der Universität Bayreuth werden von Prof. Natalia Dubrovinskaia und Prof. Leonid Dubrovinsky betreut (Foto: Natalia Dubrovinskaia).





■ Christoph Schmidt  
Ludwig Zöller

# Zeitreisen ins Erdinnere

Lichtsignale weisen den Weg zur Aktivität von Vulkanen

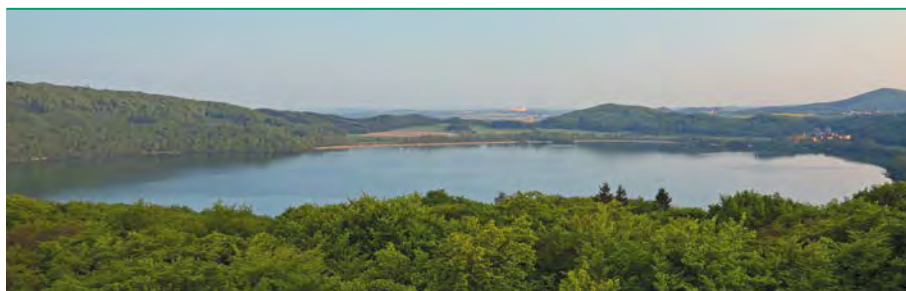
■ *Vulkankrater in Kamerun. Die „Kamerunlinie“ ist eine Kette von Vulkanen, die sich vom Golf von Guinea bis in das Innere des afrikanischen Kontinents erstreckt (sst).*

Die Erforschung des Erdinneren ist wichtig, um die Entstehung unseres Planeten zu verstehen. Vulkane gehören zu den wenigen „Fenstern“, die Einblicke ins Erdinnere gewähren. Dies geschieht vor allem dadurch, dass sie Gesteine aus dem sonst unzugänglichen Erdmantel an die Oberfläche befördern. Für die in ihrem Umkreis lebende Bevölkerung haben Vulkane unmittelbare Auswirkungen: Den Vorteilen fruchtbarer Böden, die durch die Vulkanasche „gedüngt“ werden, stehen die Gefahren gegenüber, die ein Ausbruch mit sich bringt. Nicht allein für die Forschung, sondern auch für Risikoanalysen und präventive Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung ist es daher von großer Bedeutung, den „Rhythmus“ einzelner Vulkane und vulkanisch aktiver Regionen zu verstehen. Hierzu zählt auch die Datierung früherer Eruptionen, für die es heute eine Vielzahl technisch hochentwickelter Methoden und Instrumente gibt.

### Erfolgreiche Forschung in der Eifel

Nicht nur in fernen Ländern, sondern auch bei uns in der Eifel gibt es Vulkanismus. Er hat seine Spuren unter anderem in den Maaren hinterlassen, die entstanden sind, als heißes aufsteigendes Magma auf das Grundwasser stieß und Explosionen auslöste. Mit der Radiokohlenstoffmethode, die aus der Archäologie bekannt ist, konnten die jüngsten Eruptionen zeitlich einigermaßen sicher eingeordnet werden: Das Ulmener Maar ist rund 11.000 Jahre alt, der Laacher See-Vulkan etwa 12.900 Jahre alt. An vielen anderen Orten in der Eifel erweist sich die zuverlässige Datierung von Vulkanausbrüchen jedoch als schwierig: Oft ist das für die Radiokohlenstoffmethode benötigte organische Material nicht vorhanden, und die Argon-Altersmethode liefert in der Regel nur sehr ungenaue Daten, wenn Gesteinsproben jünger als etwa 100.000 Jahre sind.

In solchen Fällen ist die Lumineszenzmethode aussichtsreicher. Durch sie kann man feststellen, wie lange die letztmalige Erhitzung von Mineralen zurückliegt. Allerdings ist sie unzuverlässig, wenn die untersuchten Minerale erst durch den Vulkanausbruch entstanden sind. Deshalb haben Forscher der Universität Bayreuth Minerale in älterem Gestein analysiert, das während eines Vulkanausbruchs von Lava bedeckt und erhitzt wurde. Auch Minerale in Xenolithen wurden untersucht. Dies sind Bruchstücke der Erdkruste, die bei der Eruption ausgeworfen und in der Lava eingeschlossen wurden. So konnten die Wissenschaftler mit der Lumineszenzmethode das Alter mehrerer Eruptionsorte in der Eifel



■ Abb. 1: Der Laacher See, ein Vulkankrater in der Eifel (Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0,2.5,2.0,1.0 / Photograph by A.Savin).

zuverlässig bestimmen: Proben von Quarzit- und Schiefer-Xenolithen lieferten den Nachweis, dass der Wartgesberg-Vulkan  $33.600 \pm 2.400$  Jahre alt, die Facher Höhe – anders als bisher vermutet – jedoch viel jünger ist. Mit  $15.500 \pm 1.100$  Jahren ist sie der drittjüngste datierte Vulkan der Eifel.

Genauso zuverlässig ist die Lumineszenzmethode bei der Datierung von Eruptionen, die mehr als hunderttausend Jahre zurückliegen. Dies zeigt eine weitere Studie zum Vulkanismus in der Eifel. Nicht nur für Geowissenschaftler, sondern auch für Archäologen und Paläoanthropologen ist dieser Vulkankomplex hochinteressant. Denn in einem der Krater wurde vor mehr als zwei Jahrzehnten ein Teil eines Neandertalerschädels entdeckt. Lumineszenz-

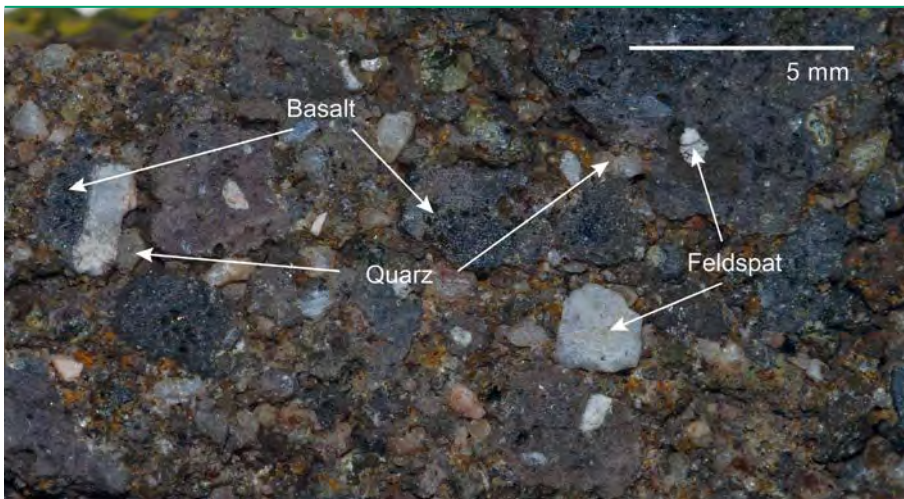
### Die Lumineszenzmethode

In der Natur kommen überall kleinste Mengen radioaktiver Elemente vor, die ionisierende Strahlung erzeugen. Dazu zählen vor allem Uran, Thorium und Kalium. Wenn Minerale wie Quarz oder Feldspat einem Feld ionisierender Strahlung ausgesetzt werden, nehmen sie die darin enthaltene Energie auf und speichern einen Teil davon. Diese gespeicherte Energie (*Dosis*) kann vollständig oder auch teilweise gelöscht werden – und zwar durch Erhitzung oder Belichtung des Minerals. Dabei sendet das Mineral ein Lichtsignal aus, das in der Forschung als Lumineszenzsignal bezeichnet wird.

Bei einem Vulkanausbruch werden Minerale normalerweise so stark erhitzt, dass ihre Dosis vollständig gelöscht und über das Lumineszenzsignal abgegeben wird. Danach bauen sie eine neue Dosis auf. Durch Erhitzung des Minerals im Labor kann auch diese Dosis vollständig gelöscht werden; wie hoch sie ist, lässt sich an der Stärke des Lumineszenzsignals ablesen. Unter der Voraussetzung, dass das Mineral seit dem Vulkanausbruch eine gleich hohe Energiemenge pro Zeiteinheit (*Dosisleistung*) gespeichert hat, lässt sich nun exakt berechnen, wieviel Zeit seit dem Ausbruch vergangen ist. Diese Zeit wird auch als *Alter* des Vulkans bezeichnet. Es gilt die Formel:

$$\text{Alter} = \frac{\text{Dosis}}{\text{Dosisleistung}}$$

Die Zuverlässigkeit der Datierung hängt entscheidend davon ab, dass das zu datierende Ereignis eine vollständige Löschung der im Mineral gespeicherten Dosis bewirkt hat. Bei einer vulkanischen Eruption ist dies in der Regel der Fall. Wenn die Dosis jedoch nur teilweise gelöscht wurde und fälschlicherweise eine vollständige Löschung angenommen wird, führt die Lumineszenzmethode dazu, dass die seit dem Ereignis vergangene Zeit überschätzt wird.



■ Abb. 2: Gestein am Kraterrand des Nyos-Vulkans. Nicht nur vulkanisches Gestein wie der Basalt, sondern auch Minerale wie Quarz und Feldspat wurden ausgeworfen (Foto: Christoph Schmidt).



■ Abb. 3: Dr. Christoph Schmidt (li.) bei Geländearbeiten in Kamerun (Foto: Boris Keuko Djoumbissie).

AUTOREN



■ Dr. Christoph Schmidt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geomorphologie an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Ludwig Zöller ist Inhaber des Lehrstuhls für Geomorphologie.

Untersuchungen der Bayreuther Forscher ergaben, dass der Schädel maximal zwischen 180.000 und 190.000 Jahre alt sein muss, und erhärteten so die Ergebnisse, die zuvor mit anderen Messmethoden erzielt worden waren.<sup>1</sup> Es handelt sich tatsächlich um den ältesten bekannten Schädel eines „klassischen Neandertalers“. Die bisherigen Funde aus der Zeit dieser Neandertaler sind mit 50.000 bis 60.000 Jahren deutlich jünger.

Die Datierungen von Vulkanausbrüchen in der Eifel können dazu beitragen, einer interessanten Hypothese auf den Grund zu gehen. Bisherige Forschungsarbeiten zum quartären Eiszeitalter, das vor 2,58 Millionen Jahren begann, legen nämlich die Überlegung nahe, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Klima und der vulkanischen Aktivität in der Eifel gibt. In diesem Fall hat das während der Kaltzeiten aus Skandinavien nach Süden vorrückende Eis die Eifel zwar nicht erreicht, doch es hat bis weit nach Süden einen starken Druck auf die Lithosphäre ausgeübt, die die Erdkruste und die oberste Schicht des Erdmantels umfasst. Sobald die Eismassen schmolzen, ließ der Druck nach. Diese enormen Druckveränderungen hatten jedesmal zur Folge, dass sich auch die Strömungen heißer Gesteine unterhalb der Erdkruste änderten. So könnten das schnell vorrückende Eis am Beginn von Kaltzeiten und die Tauprozesse an ihrem Ende verstärkte vulkanische Aktivitäten in der Eifel ausgelöst haben. Um diese Hypothese zu überprüfen, benötigt die Forschung jedoch umfassendere, weit in die quartären Eiszeiten zurückreichende Datensätze. Auch hierzu wird die Lumineszenzmethode wichtige Beiträge leisten.

Von der Eifel nach Zentralafrika

Vulkane können noch lange Zeit nach einer Eruption die in ihrem Umkreis lebende Bevölkerung bedrohen. Dies wurde am 21. August 1986 in Kamerun deutlich, als im Nyos-Kratersee im Westen des Landes große Mengen Kohlendioxid freigesetzt wurden. Etwa 1.700 Menschen, die in umliegenden Tälern siedelten, starben durch Erstickung. Nach dieser Katastrophe stieg das Interesse an einer zuverlässigen Datierung der letzten Eruption erheblich. Denn auf dieser Grundlage würde sich besser abschätzen lassen, welches Risiko von ähnlichen Maaren in der Region ausgeht. Alle Versuche, die Entstehung des Nyos-Maars mit unterschiedlichen Methoden zu datieren, hatten bis dahin zu keinem eindeutigen Ergebnis geführt: Das geschätzte Alter schwankte zwischen 400 und 400.000 Jahren.

Geomorphologen aus Bayreuth gelang jedoch 2017 eine präzise zeitliche Einordnung. Zwar erwies es sich zunächst als schwierig, in dem am Kraterrand verstreuten Gestein Xenolithe zu entdecken, die beim letzten Ausbruch durch Lava erhitzt worden waren. Doch Quarzkörnchen, die sich aus einigen Gesteinsbrocken herauslösen ließen, erwiesen sich nach intensiven Tests als geeignet für die Anwendung der Lumineszenzmethode. Offenbar hatten bei der letzten Explosion so hohe Drücke und Temperaturen auf den Quarz eingewirkt, dass die darin gespeicherte Energie vollständig gelöscht wurde und sich ein neues Lumineszenzsignal aufbauen konnte. Die Messungen ergaben, dass die Explosion höchstens  $12.300 \pm 1.500$  Jahre zurückliegt. Diese Datierung ermöglicht nun genauere Risikoabschätzungen für die

benachbarten Maare. Sie ist zudem ein hilfreicher Anhaltspunkt für die Erforschung des Vulkanismus entlang der „Kamerunlinie“. Die Vulkane in dieser Kette sind nicht hintereinander in räumlicher und zeitlicher Folge, sondern scheinbar zufällig ohne ein erkennbares geologisches Muster ausgebrochen. Umso größer ist das Interesse der Forschung, den bislang intensiv diskutierten Ursachen dieser Eruptionen endlich auf die Spur zu kommen.

### Lichtsignale als Archive der Landschaftsgeschichte

Lumineszenz trägt auch dazu bei, das Zusammenwirken von Plattentektonik und Klima bei der Entwicklung von Landschaftsreliefs zu ergründen. Sobald ein Gebirge entsteht, setzen Gegenkräfte ein: Wasser, Eis und Wind sind die Hauptakteure in lang anhaltenden Erosionsprozessen, bei dem die Oberflächen der Gebirge stetig abgetragen werden. Gestein, das einst tief in der Erdkruste versenkt war, kommt so der Erdoberfläche immer näher und kühlt dadurch ab. Wenn man weiß, um wieviel Grad sich das Gestein pro Zeiteinheit abkühlt, lassen sich verlässliche Rückschlüsse auf den Verlauf und das Ausmaß der Erosion ziehen. Daraus wiederum ergeben sich neue Einsichten in die langfristige Gebirgsentwicklung und den Einfluss des Klimas auf die Intensität der Erosion. Bei der Suche nach Endlagern für radioaktive Abfälle, die auch in den nächsten hunderttausend Jahren noch sicher sind, spielen derartige Informationen eine zentrale Rolle.

Die Abkühlung des Gesteins pro Zeiteinheit, die Abkühlungsrate, kann man heute mit der Lumineszenz-Thermochronometrie abschätzen. Entscheidend ist dabei, dass Minerale – sobald eine bestimmte Temperatur unterschritten ist – infolge der ionisieren-

## „Für präventive Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung ist es von großer Bedeutung, den ‚Rhythmus‘ einzelner Vulkane und vulkanisch aktiver Regionen zu verstehen.“

den Strahlung in ihrer Umgebung ständig Energie aufnehmen und speichern, aber immer nur einen Teil davon abgeben. Daher baut sich im Mineral eine Energiemenge auf, die umso größer wird, je länger das Mineral infolge des kleiner werdenden Abstands zur Erdoberfläche abkühlt. Dieser Prozess, in dem sich der Verlauf und das Ausmaß der Erosion widerspiegeln, lässt sich am Lumineszenzsignal des Minerals ablesen. Ein von der Oberfrankenstiftung gefördertes Forschungsprojekt der Bayreuther Geomorphologie hat es kürzlich bestätigt: Die Lumineszenz-Thermochronometrie ist ein vielversprechendes Verfahren, um herauszufinden, wie sich Landschaften mit ihren Höhen und Tälern in Hunderttausenden von Jahren herausgebildet haben.<sup>2</sup>

- 1 D. Richter, P. Klinger, C. Schmidt et al.: New chronometric age estimates for the context of the Neanderthal from Wannan-Ochtendung (Germany) by TL and argon dating. *Journal of Archaeological Science: Reports* (2017), 14, 127-136. DOI: 10.1016/j.jasrep.2017.05.032.
- 2 Vgl. dazu C. Schmidt, J. Friedrich, L. Zöller: Thermochronometry using red TL of quartz? – Numerical simulation and observations from in-situ drill-hole samples. *Radiation Measurements* (2015), 81, 98-103. DOI: 10.1016/j.radmeas.2015.04.004.

■ Abb. 4: Der Kratersee des Nyos-Vulkans im Kamerun (sst).



■ Abb. 5: Schlackenkegel bei Foubot an der Kamerunlinie. Aufgrund der fruchtbaren Böden ist die Region dicht besiedelt (Foto: Christoph Schmidt).



### LITERATURTIPP

C. Schmidt, J. P. Tchouankoue, P. N. Nkouamen Nemzoue et al.: New thermoluminescence age estimates for the Nyos maar eruption (Cameroon Volcanic Line). *PLOS ONE* (2017), 12(5): e0178545. DOI: 10.1371/journal.pone.0178545.



■ Julian Rüdiger  
Andreas Held

# Vulkanfahnen im Labor

Was vulkanische Gase über Aktivitäten im Erdinneren verraten

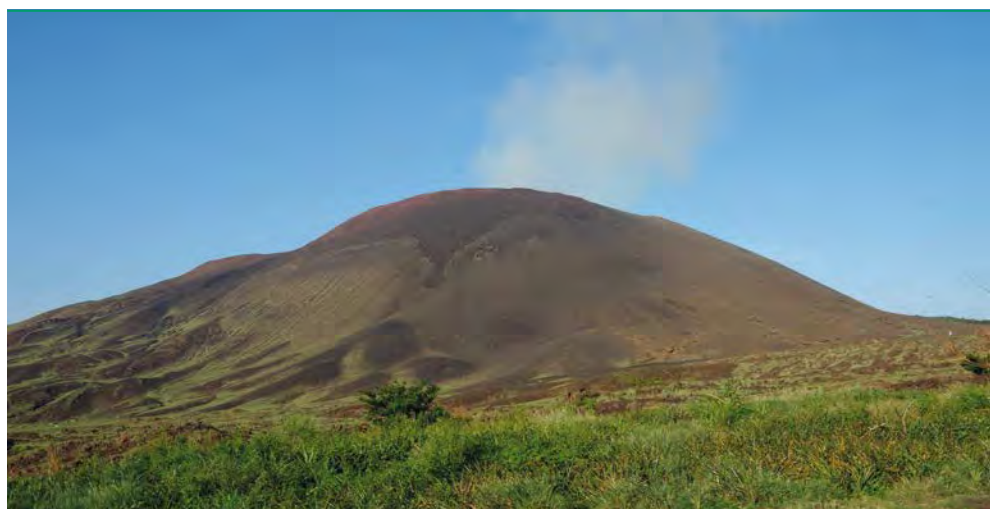
■ Aktiver Vulkanschlot mit oberflächlichem Lava-See  
am Masaya-Vulkan, Nicaragua (Foto: Julian Rüdiger).

Vulkane gehören zu den beeindruckendsten Phänomenen, welche die innere Unruhe unseres Planeten widerspiegeln. Im vorigen Jahrhundert waren weltweit mehr als 380 Vulkane aktiv, ungefähr 50 Vulkane brechen jedes Jahr aus. Viele Vulkane befinden sich in der Nähe von plattentektonisch aktiven Regionen, beispielsweise dem *Ring of Fire* rund um die pazifische Kontinentalplatte. Weltweit leben mehr als 700 Millionen Menschen in der Nähe aktiver Vulkane und sind daher unmittelbar der Gefahr von Ausbrüchen ausgesetzt, wie die jüngsten Ereignisse auf Hawaii am Vulkan Kilauea zeigen. Selbst entferntere Regionen können von ausbrechenden Vulkanen direkt betroffen sein: Die Eruption des Eyjafjallajökull auf Island im Jahr 2010 hatte ökologische und wirtschaftliche Folgen, die über Europa hinaus bis nach Afrika reichten.

### Vulkangase: Aus dem Magma in die Atmosphäre

Obgleich viele Vulkane nicht permanent ausbrechen, ist die Gefahr eines Ausbruchs immer vorhanden. Wann es tatsächlich zu einem Ausbruch kommt, lässt sich nur unzureichend genau vorher sagen. Bei der Überwachung von Vulkanen kommen geophysikalische Messmethoden zum Einsatz, um die Aktivität eines Vulkans zu beobachten und eine Änderung abschätzen zu können. Mit dem gleichen Ziel werden die von Vulkanen ausgestoßenen Gase chemisch analysiert. Dies sind hauptsächlich Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Halogenwasserstoffe. Zudem werden auch Spuren von Schwermetallen, Edelgasen und vielen anderen Verbindungen freigesetzt.

Der Ursprung dieser Gase liegt tief im Erdinneren. In der Erdkruste und im Erdmantel, wo Temperaturen von rund 1.000 Grad Celsius und Drücke von mehr als 2.000 bar herrschen, sind die Gase im flüssigen Gestein gelöst. Diese Gesteinsschmelze sammelt sich unterhalb von Vulkanen in Magmakammern. Wenn sich nun ein Teil des Magmas einen Weg durch Vulkanschlote nach oben in Richtung Erdoberfläche bahnt, sinkt der lithostatische Druck auf das Magma. Dies ist der Druck, den die über dem Magma liegenden Gesteinsschichten durch ihr Gewicht ausüben. Infolge des sinkenden Drucks, dem das aufsteigende Magma ausgesetzt ist, können einige Gase nicht mehr in Lösung bleiben. Genauer gesagt verlieren die einzelnen Gase ihre Löslichkeit bei unterschiedlich hohen Drücken, also in verschiedenen Tiefen innerhalb des Vulkanschlots. Sie bilden Gasblasen,



■ Abb. 1: Der Masaya-Vulkan in Nicaragua mit aufsteigender Vulkanfahne (Foto: Julian Rüdiger).

die sich teilweise aus dem Magma lösen und zur Erdoberfläche aufsteigen. Jetzt werden die Gase in die Atmosphäre ausgestoßen, was sich in vielen Fällen an einer weithin sichtbaren Vulkanfahne erkennen lässt. Wenn es gelingt, die Anteile der einzelnen Gase an der Vulkanfahne zuverlässig zu messen, lassen sich daraus Rückschlüsse über das im Erdinneren aufsteigende Magma und die Aktivität des Vulkans ziehen.

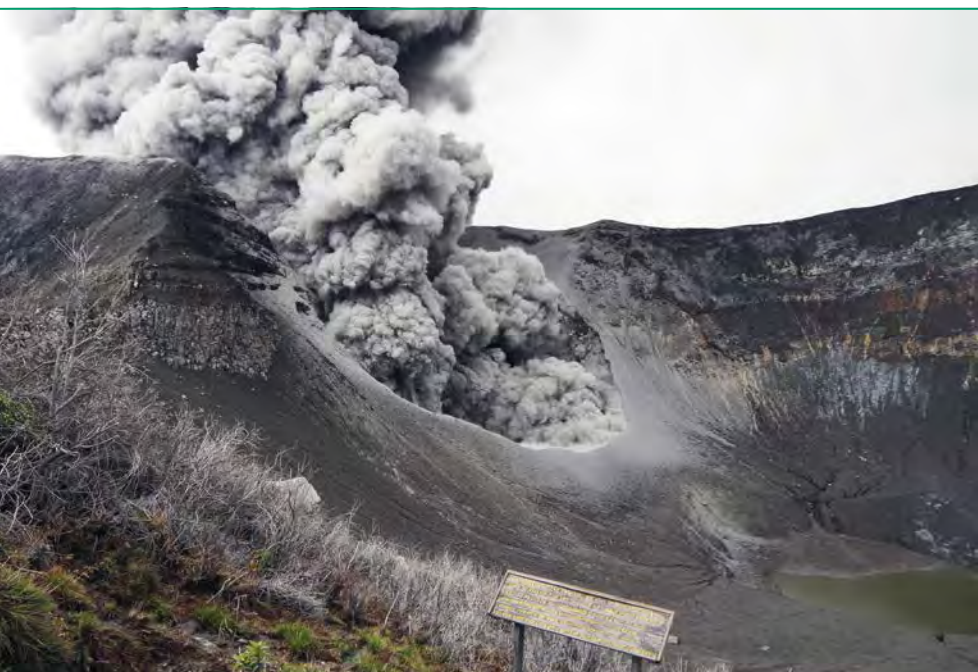
### Indikatoren für die Aktivität von Vulkanen

In zahlreichen Studien hat sich das Verhältnis des Kohlenstoffdioxid-Anteils ( $\text{CO}_2$ ) zum Schwefeldioxid-Anteil ( $\text{SO}_2$ ) in den emittierten Vulkangasen als guter Indikator für die Aktivitätsbeurteilung eines Vulkans erwiesen. Man geht heute davon aus, dass  $\text{CO}_2$  bei höheren Drücken – und somit in größerer Tiefe – freigesetzt wird als  $\text{SO}_2$ . Folglich deutet ein steigender  $\text{CO}_2$ -Anteil darauf hin, dass frisches Magma tief unten in den Vulkanschlott gelangt ist und der Vulkan demnächst eine stärkere Aktivität aufweist. In den meisten Fällen kommen bei solchen Messungen *in-situ*-Techniken zum Einsatz. Dabei müssen die Messinstrumente direkt in der Vulkanfahne platziert werden. Dies ist oft nur in der Nähe des Kraterrandes möglich, weil hier die Fahne noch in Bodennähe zugänglich ist, bevor sie vom Wind weggetragen wird. Für die Forscher birgt der Aufenthalt am Kraterrand eines aktiven Vulkanschlots jedoch immer die Gefahr, bei Explosionen von fliegenden Gesteinsbrocken, den Projektilen, getroffen zu werden. Deshalb sind sie bestrebt, die Aufenthaltszeit so gering wie möglich zu halten. Sowohl Projektilen als auch Ascheregen erschweren die Stromversorgung und den laufenden Betrieb stationärer Messinstrumente.

„Im Umkreis der Vulkane ist es schwierig, Experimente unter klar definierten Bedingungen durchzuführen.“

#### LITERATURTIPP

J. Rüdiger, J.-L. Tirpitz, J. Maarten de Moor et al.: Implementation of electrochemical, optical and denuder-based sensors and sampling techniques on UAV for volcanic gas measurements: examples from Masaya, Turrialba and Stromboli volcanoes. *Atmospheric Measurement Techniques* (2018), 11, 2441-2457. DOI: 10.5194/amt-11-2441-2018.



■ Abb. 2: Ausbruch des Vulkans Turrialba in Costa Rica (Foto: Julian Rüdiger).

- 1 Zu den Verfahren der spektroskopischen Fernerkundung vgl. U. Platt, N. Bobrowski, A. Butz: Ground-based remote sensing and imaging of volcanic gases and quantitative determination of multi-species emission fluxes. *Geosciences* (2018), 8(2), 44. DOI: 10.3390/geosciences8020044.
- 2 N. Bobrowski, G. Giuffrida: Bromine monoxide / sulphur dioxide ratios in relation to volcanological observations at Mt. Etna 2006–2009. *Solid Earth* (2012), 3, 433–445. DOI: 10.5194/se-3-433-2012.
- 3 J. Rüdiger, J.-L. Tirpitz et al. (2018): siehe Literaturtipp.

Hingegen lassen sich mit spektroskopischen Fernerkundungssystemen die Spurengase in sicherem Abstand messen.<sup>1</sup> Eine wichtige Technik ist hierbei die differenzielle optische Absorptionsspektroskopie (DOAS). Sie ermöglicht es, Spurengase wie Schwefeldioxid oder Brommonoxid in den Vulkanfahnen zu detektieren. Entscheidend für diese Messergebnisse ist, wie stark das Sonnenlicht durch die Vulkanfahne absorbiert wird.

In den letzten Jahren hat das aus sicherer Distanz messbare Verhältnis des Brommonoxid-Anteils (BrO) zum Schwefeldioxid-Anteil (SO<sub>2</sub>) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Empirische Studien an verschiedenen Vulkanen ergaben, dass sich dieses Verhältnis mit der Aktivität des Vulkans ändert.<sup>2</sup> So konnte man beobachten, dass in Phasen erhöhter Aktivität das Verhältnis von BrO zu SO<sub>2</sub> in der Vulkanfahne geringer ist als zu Zeiten niedrigerer Aktivität.

Zudem wurde beobachtet, dass dieses Verhältnis unmittelbar vor Eruptionen signifikant abfällt. Allerdings tritt nicht das Brommonoxid (BrO), sondern Bromwasserstoff (HBr) direkt aus den Vulkanen aus. Erst wenn der emittierte HBr in der Troposphäre, der untersten Schicht der Erdatmosphäre, mit Ozon reagiert, entsteht BrO. Wie beim Indikatorsystem CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> nimmt man an, dass HBr in größerer Tiefe entgast als SO<sub>2</sub> und auf frisches aufsteigendes Magma hindeutet.

Wenn HBr in der Troposphäre in BrO umgewandelt wird, läuft eine sich beschleunigende Kettenreaktion ab, die auch als „Bromexplosion“ bezeichnet wird. An diesem Vorgang sind zahlreiche chemische Prozesse in der Atmosphäre beteiligt, insbesondere der Abbau von troposphärischem Ozon. Alle diese Prozesse sind ihrerseits abhängig von meteorologischen Faktoren wie Sonneneinstrahlung oder Luftfeuchtigkeit. Wie hoch der Anteil des Brommonoxids in der Vulkanfahne ist, hängt daher nicht allein von der Menge des Bromwasserstoffs ab, die ursprünglich aus dem Vulkan ausgetreten ist. Ebenso wichtig sind die jeweiligen atmosphärenchemischen Prozesse und ihre meteorologischen Randbedingungen. Sie müssen wissenschaftlich zureichend verstanden sein, damit man aus dem in der Vulkanfahne gemessenen BrO-Anteil die Menge des emittierten HBr ableiten kann. Erst dann lassen sich aus dem Verhältnis von BrO zu SO<sub>2</sub> verlässliche Rückschlüsse auf die Vulkanaktivität ziehen.

In einigen Feldstudien wurde daher der Einfluss von vulkanologischen und meteorologischen Parameter auf die Bildung von BrO untersucht. Computermodele halfen, ein genaueres Verständnis der komplexen Atmosphärenchemie zu erlangen, die hier eine Rolle spielt. Darüber hinaus haben die Wissenschaftler kürzlich Versuche unternommen, diese Modellstudien mittels umfangreicher Feldmessungen zu überprüfen, bei denen auch unbemannte Fluggeräte (Drohnen) zum Einsatz kamen.<sup>3</sup>

## Vulkanfahnen in der Simulationskammer

Vulkane sind jedoch nicht immer leicht zugänglich, und auch die meteorologischen Gegebenheiten können starken Schwankungen unterliegen. Deshalb ist es im Umkreis der Vulkane schwierig, Experimente unter klar definierten Bedingungen durchzuführen. Diese Probleme lassen sich aber umgehen, indem man die Experimente in einer Atmosphärensimulationskammer durchführt. Hier ist es

In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt **HALVIRE: HAL**ogen activation in **Volcanic plumes In Reaction Chamber Experiments** kooperiert die Atmosphärische Chemie der Universität Bayreuth mit dem Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, dem Institut für Anorganische Chemie und Analytische Chemie der Universität Mainz und dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz. Seit 2017 finden am Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) Experimente statt, die darauf abzielen, atmosphärenchemische Reaktionen in den Emissionsfahnen von Vulkanen besser zu verstehen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen langfristig dazu beitragen, Vulkanausbrüche genauer als bisher vorherzusagen zu können.





■ Abb. 3: Julian Rüdiger beim Einsatz eines unbemannten Fluggeräts zur Messung vulkanischer Gase am Masaya-Vulkan (Foto: Alexandra Gutmann).

möglich, meteorologische Parameter – insbesondere Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Ozonkonzentration und Sonneneinstrahlung – exakt einzustellen. Mit aufeinander abgestimmten Instrumenten können zahlreiche Gase und ihre chemischen Reaktionen gleichzeitig beobachtet werden.

Ein besonders leistungsfähiges Hilfsmittel ist die Teflon-Folien-Kammer an der Universität Bayreuth. Es handelt sich um einen rund 2,5 Meter hohen Zylinder aus Teflon-Folie mit einem Durchmesser von 1,4 Metern. Teflon hat als Kammermaterial im Unterschied zu anderen Materialien den Vorteil, dass bei den Untersuchungen an den Gasen keine oder nur geringfügige Oberflächenreaktionen auftreten. Ein unter der Kammer installierter Sonnensimulator erzeugt ein Lichtspektrum, das dem der Sonne gleicht; ein klimatisierter Untersuchungsraum ermöglicht eine konstante Luftfeuchtigkeit und Temperatur. So können die Wissenschaftler Vulkanfahnen mit exakt definierten Anteilen von Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Stickoxid und Halogenwasserstoffen simulieren. Dabei können sie beobachten, wie sich die zuvor definierten meteorologischen Parameter auf die simulierten Vulkangase auswirken. Auch die Entstehung von BrO aus HBr und das daraus resultierende BrO/SO<sub>2</sub>-Verhältnis lassen sich fortlaufend verfolgen.

Ein in der Kammer installiertes DOAS-Spektrometer macht es möglich, das Mischungsverhältnis von BrO und SO<sub>2</sub> zu jedem Zeitpunkt zu messen.

Mit den verschiedensten atmosphärischen Szenarien, die in der Teflon-Folien-Kammer simuliert werden, wollen die Wissenschaftler alle Parameter, die für die BrO-Entstehung in Vulkanfahnen relevant sind, identifizieren und deren Einfluss möglichst präzise quantifizieren. Modellsimulationen am Computer sollen die Interpretation der im Experiment gewonnenen Daten unterstützen.

### Auf dem Weg zu verlässlichen Prognosen

Werden die Simulationen dazu beitragen, dass eine fortlaufende Überwachung des BrO/SO<sub>2</sub>-Verhältnisses in realen Vulkanfahnen geeignet ist, die Aktivität der Vulkane zu ermitteln und bevorstehende Ausbrüche genauer als bisher zu prognostizieren? Derzeit ist diese Frage noch offen. Weltweit werden zahlreiche Vulkane von DOAS-Spektrometern in Bezug auf ihre SO<sub>2</sub>-Emissionen beobachtet. Diese Überwachung ließe sich in Zukunft problemlos auf das BrO/SO<sub>2</sub>-Verhältnis ausweiten – vorausgesetzt, dass der BrO-Anteil in der Vulkanfahne präzise messbar ist und dass man aus den gewonnenen Daten auf die aus dem Vulkanschlot emittierten HBr-Mengen zurückschließen kann. Nur wenn dies zuverlässig gelingt, kann sich in der Vulkan-Überwachung die kontinuierliche Messung und Interpretation des BrO/SO<sub>2</sub>-Verhältnisses als ein Verfahren etablieren, mit dem Vulkanausbrüche besser als bisher vorhergesagt werden können. Hierzu wollen die Bayreuther Forschungsarbeiten einen Beitrag leisten.

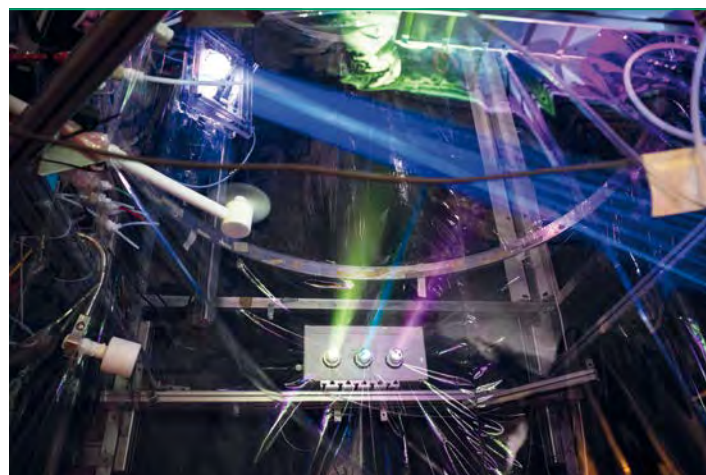
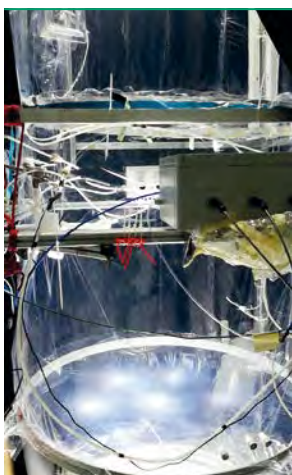
### AUTOREN



■ Julian Rüdiger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Bereichs Atmosphärische Chemie an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Andreas Held war bis April 2018 Professor für Atmosphärische Chemie an der Universität Bayreuth. Er arbeitet heute an der TU Berlin.



■ Abb. 4 (links): Teflon-Folien-Kammer mit eingeschaltetem Sonnensimulator (unten), dem 3-Kanal-DOAS-System und peripheren Anschlüssen weiterer Gasanalysatoren. Hier können Spurengase im ppb-Bereich (part per billion – Teile pro Milliarde) detektiert werden (Foto: Julian Rüdiger).  
Abb. 5 (rechts): Differenzielle optische Absorptionsspektrometer in der Teflon-Folien-Kammer: oben links die Reflexionsspiegel des UV-Spektrometers, zentral in der Mitte ein 3-Kanal-Spektrometer mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen (Foto: Stefan Schmitt).



■ Christian Laforsch  
Sebastian Steibl  
Robert Sigl

# Ozeanische Paradiese

Korallenriffe und Inselstrände: kostbar und von Zerstörung bedroht

■ Dornenkronenseestern (*Acanthaster planci*) in einem Aquarium der Bayreuther Tierökologie. In großen Schwärmen wird er für Korallen im Indischen und im Pazifischen Ozean zu einer tödlichen Gefahr (Foto: Jürgen Rennecke).

Immergrüne Palmeninseln mit schneeweißen Sandstränden, umgeben von kristallblauem Wasser, unter dessen Oberfläche sich eine Welt von unübertroffener Vielfalt und Schönheit verbirgt: Für Urlauber sind solche Trauminseln mit ihren vorgelegerten Korallenriffen der Inbegriff von Entspannung und Ruhe. Doch globale Klimaveränderungen, störende Eingriffe durch Tourismus, Fischerei und Landwirtschaft sowie natürliche Fressfeinde der Korallen haben sich in ihrer Summe zu einer immensen Bedrohung dieser sensiblen Lebensräume entwickelt.

Intakte Korallenriffe sind für die Stabilität der dahinterliegenden Inseln essentiell. Wie eine natürliche Barriere legt sich ein Riff zwischen Ozean und Insel und mildert dabei die Erosionskräfte der Wellen für die Küste ab. So verleihen die komplexen Kalkstrukturen der Riffe den oftmals kleinen Sandinseln die entscheidende Stabilität, die sie benötigen, um sich gegen die Kräfte des offenen Ozeans behaupten zu können. Darüber hinaus kommt den Korallenriffen eine hohe ökologische und zugleich wirtschaftliche Bedeutung zu. Viele Speisefische verbringen den ersten Teil ihres Lebens im Schutz der Korallenriffe, bevor sie die Küstengewässer in Richtung offener Ozean verlassen. Ohne ihre „Kinderstube“ in den Riffen würden sie von anderen Meeresbewohnern gefressen, bevor sie überhaupt die Fanggründe der Fischindustrie erreichen. Sowohl die Ernährung der jeweiligen lokalen Bevölkerung als auch der internationale Fischhandel wären ohne Korallenriffe erheblich beeinträchtigt. Aufgrund ihrer Schönheit und Artenvielfalt ziehen Korallenriffe jährlich Millionen von Touristen an, die gerade für die kleinen Inselstaaten des Indopazifiks eine unentbehrliche Einnahmequelle darstellen. Insgesamt wird der finanzielle Nutzen von Korallenriffen auf bis zu 30 Milliarden US-Dollar pro Jahr geschätzt.<sup>1</sup>

Obgleich Korallenriffe weniger als ein Prozent der Erdoberfläche einnehmen, bieten sie Lebensräume für ein Viertel aller Meeresorganismen. Sie sind Hotspots der Biodiversität und werden deshalb auch als „Regenwälder im Meer“ bezeichnet. Viele Korallenriffbewohner, beispielsweise Schwämme, Schnecken oder Moostierchen, produzieren Stoffe, die ein großes Potenzial in der HIV- oder Krebsforschung haben.<sup>2</sup> Daher sind Korallenriffe auch eine hochinteressante Fundgrube für die medizinische Forschung.

### „Regenwälder im Meer“ unter wachsendem Überlebensdruck

Doch ob dieses Potenzial der Korallenriffe jemals wirklich ausgeschöpft werden kann, steht in Frage. Es ist der Mensch selbst, der die Zukunft der Riffe erheblich bedroht. Insbesondere zwei Faktoren haben in den letzten Jahren zu einem weltweiten Korallensterben geführt: die Versauerung der Meere durch Kohlendioxid, das aus der Atmosphäre in die Meere gelangt, und die Erwärmung der Meere infolge des Klimawandels. Vor allem wenn sich aufgrund globaler Wetterphänomene wie dem El Niño die großen Meeresströmungen ändern, trifft aufgeheiztes Oberflächenwasser auf Korallenriffe. Da Korallen sehr sensibel auf Umweltveränderungen reagieren und nur eine geringe Toleranz gegenüber erhöhten Temperaturen haben, kann schon eine Erhöhung der Wassertemperatur um zwei bis drei Grad Celsius katastrophale Folgen für die Riffe haben. Solche vorübergehenden Temperaturanstiege haben in der Vergangenheit bereits mehrfach ein großflächiges Korallensterben ausgelöst.

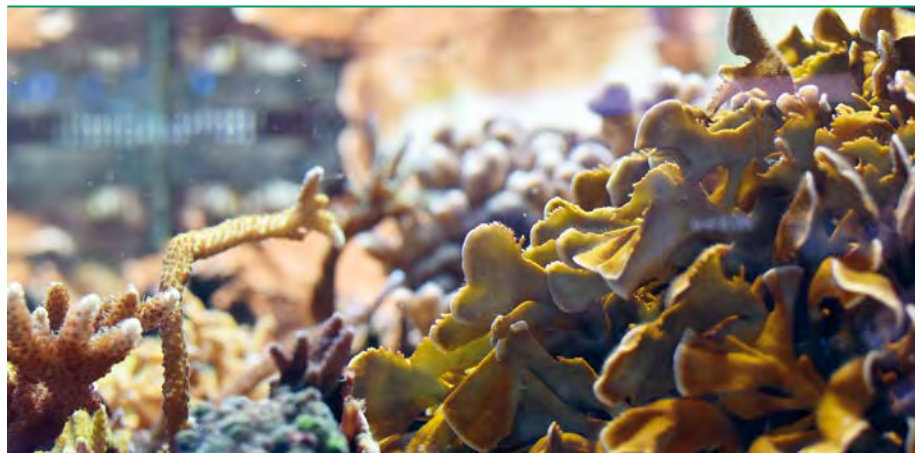
Über diese globalen Effekte hinaus stellt auch die Nutzung der Küstengebiete durch den Menschen eine große Herausforderung für die Riffe dar. Der

#### LITERATURTIPPS

R. Sigl, S. Steibl, C. Laforsch: The role of vision for navigation in the crown-of-thorns seastar, *Acanthaster planci*. *Scientific Reports* (2016), 6. DOI: 10.1038/srep30834.

R. Sigl, C. Laforsch: The influence of water currents on movement patterns on sand in the crown-of-thorns seastar (*Acanthaster cf. solaris*). *Diversity* (2016), 8. DOI: 10.3390/d8040025.

■ Abb. 1 und 2: links Wulstkoralle (*Trachiphylia*) und rechts Feuerkoralle (*Millepora*) in einem Aquarium der Bayreuther Tierökologie (Fotos: Jürgen Rennecke).



■ Abb. 3: Die Malediven-Insel Vavvaru mit einer Fläche von rund 31.000 Quadratmetern liegt im Südwesten des Lhaviyani-Atolls (Foto: Christian Laforsch).



- 1 Conservation International: Economic values of coral reefs, mangroves, and seagrasses: A global compilation. Arlington, VA, USA 2008, p.4.
- 2 So ist die Seescheide *Ecteinascidia turbinata* eine Quelle des für Chemotherapien eingesetzten Wirkstoffs Trabectedin. Aus dem Roten Büschel-Moostierchen (*Bugula neritina*) wiederum wird der Wirkstoff Bryostatine gewonnen, mit dem klinische Studien zur Behandlung von Krebs, HIV/AIDS und Alzheimer durchgeführt wurden. – Vgl. dazu R. Tohme, N. Darwiche, H. Gali-Muhtasib: A journey under the sea: the quest for marine anticancer alkaloids. *Molecules* (2011), 16, 9665-9696. DOI: 10.3390/molecules16119665.
- 3 H. K. Imhof, R. Sigl, E. Brauer et al.: Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean. *Marine Pollution Bulletin* (2017), 116 (1-2), 340-347. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.010.



■ Abb. 4: Auge eines Dornenkronenseesterns (*Acanthaster planci*), deutlich zu erkennen als roter Punkt an der Spitze des Arms (Foto: Hannes Imhof).

intensive Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft führt dazu, dass große Mengen dieser stickstoffreichen Substanzen über Flüsse und das Grundwasser in die Küstengewässer gelangen. In Verbindung mit unzureichend gefilterten Abwässern kann diese Nährstoffanreicherung zu Algenblüten führen. Die konkurrenzstärkeren Algen wiederum überwachsen die Korallen, die zunehmende Wassertrübung nimmt ihnen das Licht zum Überleben, und die Riffe sterben ab.

### Dornenkronenseesterne: in Schwärmen eine tödliche Gefahr

Eine lebensbedrohliche Gefahr für Korallenriffe, deren Ursachen bis heute nicht umfassend geklärt ist, wird derzeit an der Universität Bayreuth erforscht. Seit rund 50 Jahren beobachtet man in indopazifischen Korallenriffen ein wiederholtes Massenvorkommen von Dornenkronenseestern. Das Besondere und zugleich Bedrohliche an dieser Seesternart ist ihre Ernährung: Im Unterschied zu den meisten Seestern frisst der Dornenkronenseestern Korallen. Solange diese Tiere nur vereinzelt auftreten, ist diese Ernährungsweise für ein Korallenriff nicht weiter problematisch. Doch seit Ende der 1960er Jahre kommt es immer häufiger zu sogenannten *Outbreaks*: Dabei ziehen Hunderttausende von Dornenkronenseestern über die Riffe hinweg. Großen Heuschreckenschwärmen vergleichbar, fressen sie flächendeckend die Korallen ab, bis nur noch deren weiße Skelette übrigbleiben. Diese plötzlichen Massenvorkommen stellen die Meeresbiologie bis heute vor ungeklärte Fragen. Eine Ursache könnte darin liegen, dass von den Küsten aus mehr Nährstoffe ins Meer gelangen, die das Algenwachstum in den Riffen fördern. Dadurch haben die Larven der Seesterne, die sich von Algen ernähren, eine höhere Überlebenswahrscheinlichkeit. Eine weitere mögliche Ursache ist der intensive Fischfang, der die natürlichen Fressfeinde des Dornenkronenseesterns und seiner Larven dezimiert.

Rätselhaft ist auch das häufig zu beobachtende plötzliche Verschwinden der Seesterne, nachdem sie ein Riff kahlgefressen haben. Eine Bayreuther

Forschergruppe um Prof. Dr. Christian Laforsch hat die Hypothese untersucht, dass die Dornenkronenseesterne zwischen Korallenriffen wandern, um nach dem Kahlfressen eines Riffs zum nächsten zu gelangen. Genauere Erkenntnisse über ihre Wanderungsbewegungen könnten bei der Abschätzung des Risikos helfen, dass ein Riff in naher Zukunft von Dornenkronenseestern befallen wird.

Die Bayreuther Forscher haben entdeckt, dass die Tiere eine Fähigkeit besitzen, die eine Grundvoraussetzung für solche Wanderungen zwischen Riffen darstellt: Sie können ihren eigenen Körper als Energiespeicher nutzen, sodass sie bis zu sechs Monate vollkommen ohne Nahrung auskommen können. In dieser Zeit des Hungerns mobilisieren sie körpereigenes Gewebe als Energiereserve und schrumpfen. In einer weiteren Studie haben die Wissenschaftler das Navigations- und Orientierungsvermögen genauer untersucht. Überraschenderweise mussten sie dabei feststellen, dass der Sehsinn eine viel wichtigere Rolle für diese Tiere einnimmt, als man bisher vermutet hat. Weil Dornenkronenseesterne an jeder Armspitze mit einem Auge ausgestattet sind, haben sie jederzeit eine 360 Grad-Rundumsicht. Diesen Panoramablick unter Wasser nutzen sie dazu, größere Strukturen – wie zum Beispiel Korallen – in ihrer Umgebung ausfindig zu machen und sich gezielt darauf hinzubewegen. Ihre visuellen Fähigkeiten helfen den Tieren also tatsächlich dabei, gezielt neue Nahrungsgründe auf kürzere Distanzen zu entdecken. Für längere Wanderungen ist diese Form der Orientierung allerdings ungeeignet. Wenn optische Reize fehlen, folgen die Dornenkronenseesterne vor allem der jeweiligen Meeresströmung und wählen so den Weg des geringsten Widerstands. Alle diese wissenschaftlichen Erkenntnisse sind Mosaiksteine, die dazu beitragen, das für die Korallen tödliche Massenvorkommen dieser Tiere zu ergründen.

### Strände als künstliche Traumwelten

Die Übergangszone zwischen tropischen Korallenriffen unter Wasser und den Palmeninseln bilden die oftmals flach ansteigenden Strände. Hier sammelt sich angespültes organisches oder totes Material aus



■ Abb. 5: Im Rahmen einer Fallstudie sieben Bayreuther Studierende den Sand aus und analysieren gefundene Partikel später in einem Insel-Labor (Foto: Christian Laforsch).

den umliegenden Riffen, von dem sich viele kleinere Tiere, beispielsweise Einsiedlerkrebse, ernähren. Die Krebstiere an den Stränden sind ihrerseits Nahrung für Vögel, Säugetiere oder andere größere Landbewohner. Damit sind Strände mit ihren unterschiedlichen Bewohnern ein wichtiges Bindeglied zwischen marinen und terrestrischen Nahrungsketten. Darüber hinaus bilden vorgelagerte Strände eine Barriere, welche die dahinterliegenden Küstengebiete vor den Meereswellen abschirmen und der Erosion entgegenwirken.

Doch menschliche Aktivitäten bedrohen auch diesen Lebensraum in ähnlicher Weise wie die umliegenden Korallenriffe. Eine fortschreitende Intensivierung des Tourismus unterwirft die Strände von Koralleninseln immer stärker den Ansprüchen und Erwartungen der internationalen Gäste. Natürliche Sandstrände von Koralleninseln sind voller Algen, Treibholz und anderem verwesendem Material. Auf touristisch genutzten Inseln jedoch werden die Strände den menschlichen Idealvorstellungen eines Sandstrands künstlich angepasst. Mehrmals täglich wird alles angeschwemmte Material mechanisch entfernt, Chemikalien und Insektizide sollen Tiere fernhalten. Diese Eingriffe lassen die Strände leuchtend weiß erscheinen, aber sie führen zu einem Rückgang der Tiere und Pflanzen, die an natürlichen Stränden heimisch sind. Eine weitere Gefahr für den sensiblen Lebensraum an der Grenze zwischen Wasser und Land

ist – neben der touristischen Übernutzung – auch die Akkumulation von Schadstoffen, die ins Wasser eingeleitet werden. Hinzu kommen die Verbauung der Strände und das Abtragen von Sand, der als Baumaterial kommerziell genutzt wird. Die Folgen, die dabei für die Strandbewohner und für die dahinter liegenden Ökosysteme der Inseln entstehen, sind oft nur schwer einzuschätzen.

Eine Fallstudie der Universität Bayreuth zeigt, dass die Verschmutzung der Meere durch Kunststoffe auch vor einem entlegenen Atoll nicht haltmacht.<sup>3</sup> An den Stränden der Malediven-Insel Vavvaru fanden die Forscher bis zu 1.000 von den Wellen angespülte Plastikteile pro Quadratmeter, die mehr als ein Millimeter groß waren. Die Forschungsdaten wären vermutlich noch dramatischer ausgefallen, wenn auch kleinere Mikroplastik-Partikel in die Untersuchung einbezogen worden wären. Neue Forschungstechnologien, wie sie derzeit in Bayreuth aufgebaut werden, sollen dazu beitragen, ein genaueres Bild vom Ausmaß und den Ursachen der Meeresverschmutzung durch Mikroplastik zu gewinnen.

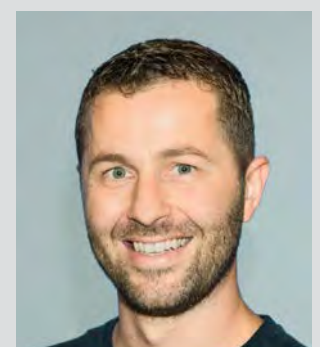
### Ein neues Forschungsvorhaben in Bayreuth

Biologen und Ökologen der Universität Bayreuth untersuchen in einem neuen Projekt, wie sich die Formen menschlicher Landnutzung auf die natürlichen Bewohner von Strandökosystemen auswirken. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, unterschiedliche Störungen möglichst vollständig in ihrer Wirkweise und ihren ökologischen Folgen zu beschreiben. Daraus können dann – in Kooperation mit Hotelbetreibern und anderen Stakeholdern des Tourismus – Maßnahmen für den Umweltschutz und eine nachhaltige Nutzung von Stränden abgeleitet werden. Das Ziel muss es sein, die Vitalität von Ökosystemen mit ihrer Nutzung durch den Menschen nachhaltig in Einklang zu bringen.

## AUTOREN



■ Prof. Dr. Christian Laforsch ist Inhaber des Lehrstuhls Tierökologie I und Vizepräsident der Universität Bayreuth für den Bereich Forschung und wissenschaftlicher Nachwuchs.



■ Sebastian Steibl M.Sc. und Dipl.-Biol. Robert Sigl (v.o.) sind Doktoranden am Lehrstuhl Tierökologie I.

**„Obgleich Korallenriffe weniger als ein Prozent der Erdoberfläche einnehmen, bieten sie Lebensräume für ein Viertel aller Meeresorganismen.“**



■ Andreas Hemp  
Claudia Hemp

# Laboratorien der Evolution

Fallstudien zur biologischen Vielfalt in Tropenwäldern

■ Nebelwald am Kilimanjaro. Kleines Bild: Blick auf die Vegetationszonen am Kilimanjaro, der heute fast vollständig von Agrarflächen umgeben ist (Fotos: Andreas Hemp).

**T**ropenwälder gehören zu den artenreichsten Lebensräumen der Welt mit Millionen von Tier- und Pflanzenarten. Weil sie in Weltregionen vorkommen, in denen die Bevölkerung am stärksten wächst, steht ihre enorme Vielfalt unter starkem Nutzungsdruck. Tropenwälder gedeihen zwischen dem nördlichen und südlichen Wendekreis. In tiefliegenden Gebieten mit ausgedehnten Trockenperioden wachsen überwiegend laubabwerfende, teilweise dornige Bäume und Sträucher. Je länger aber die feuchten Perioden werden, desto häufiger treten immergrüne Bäume auf. In den Regenwäldern der inneren Tropen, wo die Niederschläge am höchsten sind, dominieren sie die Vegetation. Hier bieten Tieflandsregenwälder, Bergregenwälder in mittleren Höhenlagen und hochmontane Nebelwälder ein sehr uneinheitliches Erscheinungsbild. An der Erforschung dieser einzigartigen Lebensräume ist auch ein Team der Universität Bayreuth um PD Dr. Andreas Hemp und Dr. Claudia Hemp beteiligt. Mehrere weltweite oder regionale, auf Ostafrika bezogene Studien wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

**„Der Kilimanjaro beherbergt nicht nur die höchsten Bäume, sondern auch die höchstgelegenen Wälder Afrikas.“**

### Die Tropenwälder der Erde, evolutionsgeschichtlich neu klassifiziert

Die Evolutionsgeschichte der Tropenwälder reicht bis in das Erdmittelalter vor 120 Millionen Jahren zurück. Noch heute lassen sich in ihrer Artenzusammensetzung Spuren gemeinsamer Wurzeln entdecken. Diesen Spuren sind Forscher von weltweit 159 Universitäten und Forschungsinstituten erstmals systematisch nachgegangen.<sup>1</sup> Durch phylogenetische Analysen fanden sie heraus, dass sich zwei Weltregionen unterscheiden lassen, in denen die Wälder untereinander einen besonders hohen Verwandtschaftsgrad aufweisen: der amerikanisch-afrikanische Raum und der indo-pazifische Raum (Abb. 2).

Vor rund 100 Millionen Jahren hat sich Südamerika aus dem südlichen Großkontinent Gondwana herausgelöst und ist nach Westen gedriftet, während aus dem Restkontinent unter anderem das heutige Afrika entstanden ist. Im Verlauf der weiteren Evolution haben sich in beiden Kontinenten zwar eigene Pflanzenarten und Vegetationen entwickelt. Doch die Tropenwälder haben sich zumindest auf der

Ebene der Baumgattungen nicht sehr weit auseinanderentwickelt, so dass man heute im Hinblick auf ihre Evolutionsgeschichte von einem amerikanisch-afrikanischen Cluster sprechen kann. Vor allem die afrikanischen Wälder vom Kongo bis nach Guinea unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung kaum. Diese ungewöhnliche Einheitlichkeit könnte mit den wiederholten Eiszeiten und den damit einhergehenden Trockenperioden zusammenhängen, denen die Wälder in diesem Großraum ausgesetzt waren.

Auf der anderen Seite weisen die Tropenwälder in Ostafrika, Madagaskar, Indien, Südostasien, Australien und auf den pazifischen Inseln trotz großer räumlicher Entfernungen eine ausgeprägte Verwandtschaft auf. Eine Ursache dafür könnte die gemeinsame Herkunft aus dem östlichen Gondwana sein. Darüber hinaus haben Biologen in den letzten zwei

Jahrzehnten nachgewiesen, dass es im Großraum rund um den heutigen Indischen Ozean mehrmals einen signifikanten biologischen Austausch von Pflanzenarten gegeben hat. Auch die Tropenwälder hatten vermutlich an diesen Wechselbeziehungen teil. So hat sich ein weiträumiges indo-pazifisches Cluster herausgebildet. Auch die Wälder auf Madagaskar und Neuguinea können diesem Cluster noch zugeordnet werden, selbst wenn die Unterschiede hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung vergleichsweise groß sind.

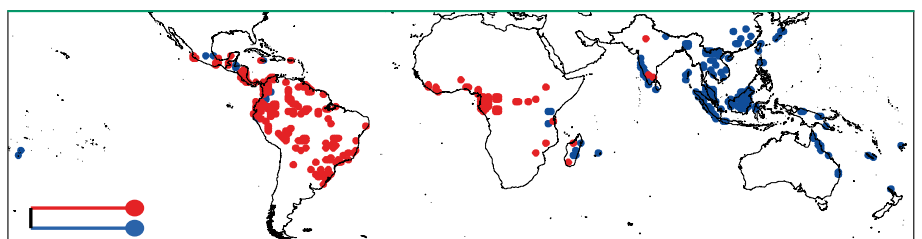
### Höchste Bäume Afrikas am Kilimanjaro

Seit dem 19. Jahrhundert sind aus Nordamerika und Australien immer wieder Rekordzahlen über beeindruckende Baumriesen gemeldet worden. In den Tropen hingegen sind solche Exemplare selten: In Südostasien erreichen nur einige Vertreter der Flügelfruchtwächse (*Dipterocarpaceen*) Baumhöhen von



■ Abb. 1: Um mehr als 30 Meter überragen die Kronen von *Entandrophragma excelsum* die normalwüchsigen Bäume (Foto: Andreas Hemp).

■ Abb. 2: Im amerikanisch-afrikanischen Raum (rot) und im indo-pazifischen Raum (blau) ist der Verwandtschaftsgrad der Tropenwälder besonders hoch. Grafik: PNAS (2018), 115 (8), 1837-1842, siehe Anm. 1.



## AUTOREN



■ Dr. Andreas Hemp ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Pflanzensystematik an der Universität Bayreuth.



■ Dr. Claudia Hemp ist Wissenschaftlerin am Lehrstuhl für Tierökologie II an der Universität Bayreuth.

mehr als 80 Metern. Lange Zeit schien es so, als ob Bäume in Afrika sowie im tropischen Amerika überhaupt keine außerordentlichen Höhen erreichen. Doch am höchsten Berg Afrikas, dem Kilimanjaro, haben die Bayreuther Forscher im Jahr 2016 in einem entlegenen Tal Bäume entdeckt, die unbestreitbar in die Top-Liste der weltweit höchsten Bäume gehören.<sup>2</sup> Es handelt sich um Bäume der Art *Entandrophragma excelsum*, die zu den Mahagonigewächsen zählen und weit älter als 850 Jahre werden können. Das größte Exemplar dieser Bäume, die von den Wissenschaftlern ausgemessen wurden, ist 81,5 Meter hoch, hat einen Durchmesser von über zwei Metern und bringt über 100 Tonnen Holzmasse auf die Waage.

Am südlichen Fuß des höchsten Bergs in Afrika wachsen diese Bäume größtenteils unterhalb des geschlossenen Bergwaldgürtels in einer Höhe zwischen 1.400 und 1.700 Metern. An Steilhängen in tiefen Waldtälern stehen sie in deutlichem Abstand voneinander – inmitten einer Vielfalt anderer Bäume. Ihre weit ausladenden Kronen überragen das dichte Blätterdach der tieferen Baumetagen. Anatomische Besonderheiten und vorteilhafte Lebensbedingungen scheinen ihr Höhenwachstum zu fördern. Im Vergleich mit benachbarten Gehölzen bieten Bäume der Art *Entandrophragma excelsum* erheblich mehr Lebensraum für epiphytische Pflanzen, insbesondere Farne, die sich auf ihren Ästen und ihrer Rinde ansiedeln. So leisten sie einen wichtigen Beitrag zur pflanzlichen Artenvielfalt.

Messungen und Hochrechnungen haben allerdings ergeben, dass es derzeit nur noch rund 1.100 Exemplare dieser Art am Kilimanjaro gibt. Submontane Regenwälder, die ihnen geeignete Lebensbedingungen bieten, sind hier selten geworden, denn schon seit Jahrhunderten hat das hier lebende Bergvolk der Chagga die Wälder an den unteren Hängen im-

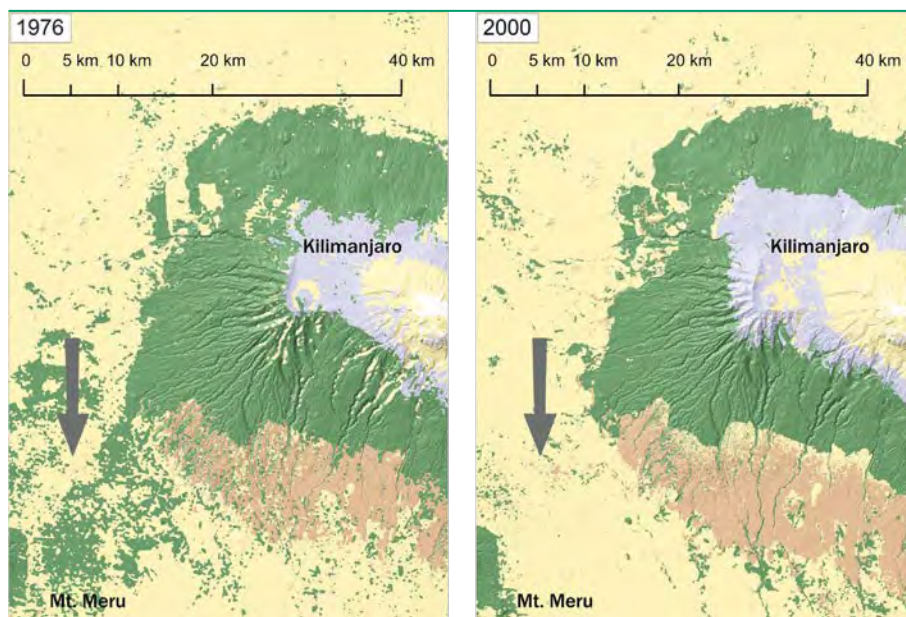
mer mehr in Bananenhaine umgewandelt. Insgesamt gibt es nur noch ungefähr sieben Quadratkilometer, auf denen Bäume der Art *Entandrophragma excelsum* am Kilimanjaro gedeihen können.

### Wenn ostafrikanische Berge zu ökologischen Inseln werden

Insgesamt ist der Kilimanjaro eine Schatzkammer der Biodiversität in Ostafrika. Auf einer vergleichsweise kleinen Fläche gibt es hier eine ungewöhnliche Vielfalt von Wäldern zu erkunden: laubabwerfende Trockenwälder in der Savanne unterhalb von 1.000 Metern, feuchte Kampfer- und Steineiben-Bergregenwälder zwischen 2.000 und 3.000 Metern, Nebelwälder in einer Höhe von 4.000 Metern. Der Kilimanjaro beherbergt damit nicht nur die höchsten Bäume, sondern auch die höchstgelegenen Wälder Afrikas.

Zunehmende Landnutzung und illegale Rodungen haben aber dazu geführt, dass die Waldgebiete Ostafrikas während der letzten Jahrzehnte immer mehr geschrumpft sind. Gerade der Kilimanjaro entwickelt sich immer mehr zu einer „ökologischen Insel“. Satellitenaufnahmen zeigen, wie sich der zwischen dem Kilimanjaro und seinem etwa 80 Kilometer entfernten Nachbarvulkan Mt. Meru gelegene Landstreifen in den 25 Jahren vor der Jahrtausendwende verändert hat. Die ursprünglich walddreiche Vegetation musste einer intensiven Landwirtschaft und der Besiedlung durch eine wachsende Bevölkerung weichen. Fast der gesamte Kilimanjaro ist heute von weiträumigen Gebieten umgeben, die durch zivilisatorische Eingriffe des Menschen geprägt sind.

Dies hat möglicherweise weitreichende ökologische Folgen, wie eine neue Studie der Bayreuther



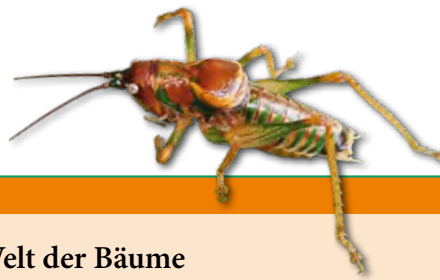
- Offenland (einschl. Agrarflächen)
- Wald / Gehölz
- Agroforst (Chagga Baumgarten)
- Subalpines Buschland
- Gletscher

■ Abb. 3: Zwischen 1976 und 2000 ist die natürliche walddreiche Vegetation zwischen dem Mt. Meru und dem Kilimanjaro weitgehend verschwunden (Grafiken: Andreas Hemp).

## LITERATURTIPP

A. Hemp, C. Hemp: Broken bridges: The isolation of Kilimanjaro's ecosystem. *Global Change Biology* (2018). DOI: 10.1111/gcb.14078.





■ Abb. 4: Heuschrecke der Gattung *Afroanthracites* (Foto: Claudia Hemp).

Forscher gezeigt hat.<sup>3</sup> Endemische, also nur in dieser ostafrikanischen Gegend heimische Heuschreckenarten haben die frühere walddreiche Vegetation wiederholt als „Brücke“ genutzt, um sich in beiden Regionen auszubreiten – und zwar unter verschiedenen Klimabedingungen während und nach der letzten Eiszeit. So lässt sich erklären, dass es endemische Arten gibt, die den verschiedenen Klimazonen der beiden Berge gemeinsam sind. Damit rühren die Forschungsergebnisse an die vieldiskutierte Frage, wie die ostafrikanischen Bergmassive während vergangener Klimaperioden besiedelt wurden. Sie erhärten die These, dass sich Tier- und Pflanzenarten hauptsächlich über Vegetationsbrücken ausgebreitet haben. Hingegen dürfte die Fernverbreitung, beispielsweise durch den Samentransport im Wind oder durch „Flugreisen“ einzelner Insekten, nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben.

Wenn Vegetationsbrücken zwischen den Bergen schwächer werden oder bereits verlorengegangen sind, schwindet aber nicht allein die Mobilität der Heuschrecken. Größere im Wald lebende Tiere, beispielsweise Antilopen, Kleinsäuger, Schlangen oder Chamäleons, drohen dann erst recht in die Isolation zu geraten und damit in absehbarer Zeit auszusterben.

## Klimawandel und Artbildung

Aber können längere Zeiträume der geographischen Isolation auch ein Motor der Evolution sein und die Herausbildung neuer Arten fördern? Um diese Frage zu untersuchen, gibt es in Ostafrika geradezu wissenschaftliche Idealbedingungen. Hier liegen sehr junge Vulkane, zum Beispiel der Kilimanjaro, direkt neben den sehr viel älteren Bergen des Eastern Arc,

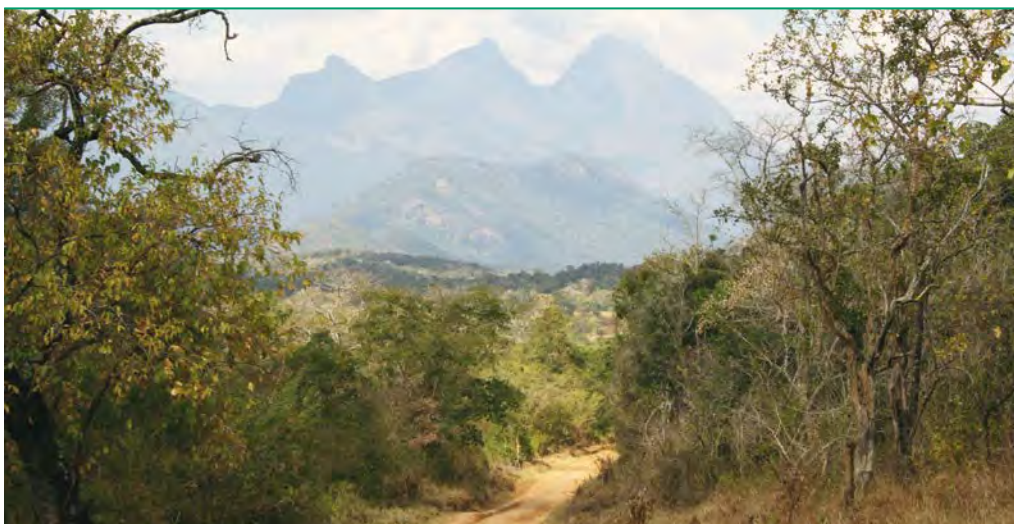
## Die Welt der Bäume

Wie viele Bäume gibt es auf der Erde, und wie verteilen sie sich auf verschiedene Klima- und Vegetationszonen? Die Ergebnisse einer Studie, an der auch die Universität Bayreuth beteiligt war<sup>5</sup>, überraschen: Mit rund 3,04 Billionen übertrifft die Zahl der weltweit existierenden Bäume frühere Schätzungen um das Sieben- bis Achtfache. Somit kommen auf jeden Menschen rund 420 Bäume. Allerdings werden derzeit jährlich mehr als 15 Milliarden Bäume gefällt.

Insgesamt wachsen 1,39 Billionen Bäume in tropischen und subtropischen Wäldern, dies sind rund 42,8 Prozent der Bäume auf der Erde. 740 Milliarden Bäume sind im Norden Amerikas, Europas und Asiens zuhause, während sich 610 Milliarden Bäume auf die gemäßigten Klimazonen der Erde verteilen. Die größte Baumdichte in den Wäldern ist allerdings nicht in den Tropen, sondern in kälteren und relativ trockenen Regionen auf der Nordhalbkugel anzutreffen. Hier können Nadelbäume auf engstem Raum zusammen wachsen und so dem Stress ungünstiger Klima- und Witterungsbedingungen standhalten.

die sich in Kenia und Tansania wie die Perlen einer Kette aneinanderreihen. Aktuelle Befunde an Heuschrecken widerlegen die bislang vorherrschende These, der Reichtum an endemischen Arten in dieser Region sei auf das hohe Alter der Eastern Arc-Berge und ein über Jahrtausende stabiles Klima zurückzuführen. Vielmehr hat es seit etwa 5 bis 8 Millionen Jahren erhebliche Klimaschwankungen gegeben. Deshalb ist es offensichtlich wiederholt vorgekommen, dass große Waldflächen geschrumpft sind und sich anschließend wieder ausgedehnt haben. Infolgedessen haben sich längere Zeiträume der Isolation und der Ausbreitung endemischer Arten mehrmals einander abgewechselt, was möglicherweise eine weitere Ausdifferenzierung von Arten stimuliert hat. Verlässliche Aussagen über diese Zusammenhänge lassen sich jedoch nur in langjährigen, wissenschaftlich anspruchsvollen Feldstudien gewinnen.<sup>4</sup>

- 1 J. W. F. Slik, J. Franklin, V. Arroyo-Rodríguez et al.: Phylogenetic classification of the world's tropical forests. *PNAS* (2018), 115 (8), 1837-1842. DOI: 10.1073/pnas.1714977115.
- 2 A. Hemp, R. Zimmermann, S. Remmele et al.: Africa's highest mountain harbours Africa's tallest trees. *Biodiversity and Conservation* (2017), 26 (1), 103-113. Vgl. auch A. Hemp: Wo die Bäume in den Himmel wachsen: die Wälder des Kilimanjaro. *Naturhistorische Gesellschaft Nürnberg* (ed.): Jahresmitteilungen – Natur und Mensch. Nürnberg 2016.
- 3 A. Hemp, C. Hemp (2018): siehe Literaturtipp.
- 4 Die Bayreuther Wissenschaftler haben dabei mit naturkundlichen Museen in Arusha, Nairobi, London, Paris, Tervuren, Berlin, Madrid, Kopenhagen, Stockholm und Wien kooperiert. So konnten die Autoren ihre evolutionsgeschichtlichen und taxonomischen Befunde mit umfangreichen Herbarien und Insektensammlungen abgleichen. Die Museen bieten nicht nur faszinierende Einblicke in die Vielfalt der Arten und in die Geschichte ihrer Evolution. Sie sind auch für die Erforschung ökologischer Zusammenhänge in Zeiten globaler anthropogener Veränderungen unverzichtbar.
- 5 T. W. Crowther, H. B. Glick, K. R. Covey et al.: Mapping tree density at a global scale. *Nature* (2015), 525, 201-205. DOI: 10.1038/nature14967. Der Beitrag enthält eine Weltkarte der Baumdichte, die auf den in dieser Studie veröffentlichten Forschungsarbeiten basiert.



■ Abb. 5: Die im Zentrum der Eastern Arc-Berge gelegenen Nguru-Berge in Tansania (Foto: Andreas Hemp).

■ Gregor Aas

# Ein Garten für die Welt



AUTOR



■ PD Dr. Gregor Aas ist seit 1996 Direktor des Ökologisch-Botanischen Gartens (ÖBG) der Universität Bayreuth.

Vor vier Jahrzehnten, nur wenige Jahre nach der Eröffnung der Universität Bayreuth im Jahre 1975, wurde ihr Ökologisch-Botanischer Garten (ÖBG) gegründet. In enger wissenschaftlicher Verzahnung mit ihrem Profildfeld „Ökologie und Umweltwissenschaften“ sollte er eine an den Klimazonen der Erde ausgerichtete vegetationsgeografische Gliederung aufweisen und naturnah gestaltet sein. Heute ist der Garten mit rund 12.000 Pflanzenarten aus allen Erdteilen und allen Klimazonen der Erde ein einzigartiger Hort für pflanzliche Artenvielfalt. Auf einem Freigelände von rund 16 Hektar erleben die Besucher mehr als 50 verschiedene Lebensräume und Pflanzengemeinschaften, die sie sonst nur auf Reisen durch Nordamerika, Asien und Europa antreffen könnten. Darüber hinaus werden in einem Nutzpflan-

zengarten jährlich etwa 900 Arten und Sorten von Nutzpflanzen, vor allem Heil- und Nahrungspflanzen, angebaut. Der ÖBG enthält aber nicht nur naturnah gestaltete und kultivierte Flächen. Das Landschaftsbild des Gartens wird ebenso geprägt von „Inseln“ naturbelassener Biotope. Dazu zählen insbesondere Feuchtflächen, große Mengen an Totholz und artenreiche Wiesen, wie beispielsweise eine Streuobstwiese mit überwiegend seltenen und alten Obstsorten.

Sechs große Schaugewächshäuser mit einer Fläche von rund 6.000 Quadratmetern bieten den Besuchern ein wechselvolles Panorama tropischer Lebensräume. Hier kann man die Klimaverhältnisse und die Pflanzenwelt von Tiefland- und Bergregenschwäldern, Mangrovensümpfen, tropischen Gebirgen und Trockenwäldern der Randtropen mit allen Sinnen wahrnehmen und erleben. In ihrem Umfang und ihrer Artenvielfalt einmalig ist die Sammlung von rund 1.700 Arten mediterraner und subtropischer Pflanzen, die während des Sommers vor den Gewächshäusern exotisches Flair verbreiten.

Auf diese Weise unterscheidet sich der ÖBG von traditionellen botanischen Gärten an anderen Universitätsstandorten, die primär darauf ausgerichtet sind, Pflanzen unter den Kriterien der Pflanzensystematik zu kultivieren und öffentlich zu präsentieren. Das von dem Bayreuther Botaniker Prof. Dr. Erwin Beck erarbeitete Konzept des Gartens, das von Prof. Dr. Günther Rossmann als Gründungsdirektor (1978 - 1996) umgesetzt wurde, stellte hingegen von vornherein die Unterscheidung zwischen klimatisch verschiedenen geprägten Ökosystemen und Lebensräumen in den Vordergrund. Hier übernehmen Pflanzen jeweils spezifische Funktionen in Wechselwirkung mit anderen Organismen. Aufgrund ihrer biologischen und ökologischen Vielfalt haben sich die Freiflächen des ÖBG mittlerweile zu einem bedeutenden Refugium



■ Abb. 1: Blick auf den Ökologisch-Botanischen Garten (Foto: Universität Bayreuth).

■ Abb. 2: Die Titanwurze, die größte Blume der Welt, blühte bereits viermal hintereinander im ÖBG (Foto: Wolfgang Ullmann).



gen nicht heimischer Pflanzenarten (Neophyten), der Diversität von Totholz bewohnenden Insekten, dem nachhaltigen Anbau tropischer Früchte in Mitteleuropa und den Auswirkungen des Klimawandels auf unsere Wälder. Zugleich bietet der ÖBG interdisziplinär ausgerichtete Lehrveranstaltungen an – insbesondere zu Nutzpflanzen der Tropen und der gemäßigten Breiten, zur Invasionsbiologie, zu Pflanze-Tier-Interaktionen oder zu Waldökologie und Forstwirtschaft. Eine große Anziehungskraft hat das vielgenutzte öffentliche Bildungsangebot entwickelt, das sich an alle Altersgruppen wendet. Mit mehr als 70.000 Besuchern pro Jahr bildet der ÖBG heute eine wichtige Brücke zwischen der Universität und den Menschen in der Stadt Bayreuth und der Region.



■ Abb. 3: Iriswiese im ÖBG (Foto: Georg Seidler).



■ Abb. 4 (links): Mediterrane und exotische Pflanzen vor den Gewächshäusern des ÖBG (Foto: Gerhard Knobloch).

■ Abb. 5 (unten): Schopfbäume im Gewächshaus für tropische Hochgebirgspflanzen (Foto: Marianne Lauerer).

für einheimische Tier-, Pflanzen- und Pilzarten entwickelt. So beherbergen sie rund 180 verschiedene Arten von Wildbienen, von denen viele vom Aussterben bedroht sind, sowie etwa 50 Vogelarten, die hier brüten. In den Gewässern des Gartens laichen seltene Amphibien wie die Gelbbauchunke.

In diese Vielfalt an Lebensräumen für Pflanzen und Tiere sind wissenschaftliche Versuchsfelder und Experimentaleinrichtungen integriert, beispielsweise ein Grundwasserbecken und eine Lysimeteranlage, mit der Austauschprozesse zwischen dem Boden und der Atmosphäre untersucht werden können. So bietet der Garten eine Infrastruktur für praxisnahe ökologische Forschung und Lehre, die nicht nur von Mitgliedern der Universität Bayreuth, sondern auch von externen Arbeitsgruppen intensiv genutzt wird. Eigene Forschungsprojekte des ÖBG widmen sich unter anderem den ökosystemaren Auswirkun-



■ Samuel Hoffmann  
Carl Beierkuhnlein  
Alessandro Chiarucci

# Europäische Schutzgebiete

Neue Studie zeigt  
facettenreiche Beiträge  
zur biologischen Vielfalt



■ Die Samaria-Schlucht im Westen der Mittelmeerinsel Kreta wurde 1962 durch ein Dekret des Königs von Griechenland zum Nationalpark erklärt. Sie unterscheidet sich in ihrer Artenzusammensetzung deutlich von anderen Schutzgebieten in der EU und leistet so einen herausragenden Beitrag zum Artenschutz (Foto: Dimitris Poursanidis).  
Kleines Bild oben: Eine gefährdete Art, die von diesem Schutzgebiet profitiert, ist der Ägäische Nacktfinger (*Mediodactylus kotschyii*), der zur Familie der Geckos gehört (Foto: Dimitris Poursanidis).  
Kleines Bild unten: In der Samaria-Schlucht blüht auch die äußerst seltene kretische weiße Pfingstrose (*Paeonia clusii* subsp. *clusii*) (Foto: Sabine Backmann / wikimedia commons / CC-BY-SA-4.0).

Das rapide Aussterben von Tier- und Pflanzenarten setzt sich auch im 21. Jahrhundert auf globaler Ebene fort. Dieser Verlust zählt zu den größten Bedrohungen für das Wohlergehen der Menschheit, das stärker von der natürlichen Vielfalt abhängt, als es den meisten Menschen im Alltag bewusst ist. Biodiversität hält Ökosysteme im Gleichgewicht, die beispielsweise ein ausgeglichenes Klima schaffen, Überflutungen abschwächen, Trinkwasser liefern und Rückzugsorte für Erholungssuchende bieten. Eines der wichtigsten Werkzeuge des Natur- und Artenschutzes sind Schutzgebiete. Sie sollen gefährdete Arten, Lebensräume und Ökosysteme nachhaltig bewahren. Manche Arten könnten heute ohne solche Schutzgebiete vermutlich nicht überleben. Angesichts der erheblichen Defizite der internationalen Umwelt- und Klimapolitik kann die Naturschutzpolitik der Europäischen Union als weltweit vorbildlich gelten.

Im Rahmen des Programms „Natura 2000“ hat die EU ihre Mitgliedstaaten verpflichtet, 1.895 charakteristische, seltene und gefährdete Pflanzen- und Tierarten zu bewahren. In Bezug auf diese Natura 2000-Arten hat die EU gesetzliche Beschränkungen für die Jagd, den Fang und den Handel erlassen.

Eine neue biogeografische Studie der Universität Bayreuth hat jetzt erstmals untersucht, inwiefern große Schutzgebiete innerhalb der EU zum Schutz von Natura 2000-Arten beitragen. Sie konzentriert sich

dabei auf Nationalparks und UNESCO-Biosphärenreservate, weil diese Schutzzonen gezielt auf die Bewahrung der Artenvielfalt ausgerichtet sind. Nicht alle der 1.895 Natura 2000-Arten kommen darin vor, aber 1.303 von ihnen wurden in die Studie einbezogen.

### Dimensionen der Biodiversität – Aktuelle Forschungsergebnisse

Zunächst ging es in der Studie darum, in Bezug auf jeden Nationalpark und jedes UNESCO-Biosphärenreservat innerhalb der EU zu ermitteln, welche Tier- und Pflanzenarten darin vertreten sind.

Hierfür haben die Bayreuther Wissenschaftler eine neuartige, auf früheren Untersuchungen aufbauende Methode entwickelt. Ausgangspunkt ist dabei die Frage, wie sich die Schutzgebiete mit den

Verbreitungsgebieten der Natura 2000-Arten überlappen. Mit Hilfe bedingter Wahrscheinlichkeiten konnte für jede Art und jedes Schutzgebiet errechnet werden, wie wahrscheinlich es ist, dass die Art in dem jeweiligen Schutzgebiet vorkommt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden dann in einem weiteren Schritt genutzt, um für jedes Schutzgebiet eine Reihe von Diversitätsindizes zu ermitteln. Hierbei handelt es sich um Kennzahlen, die auch in anderen Bereichen der Ökologie und Um-

„Es hat sich herausgestellt, dass die Nationalparks und Biosphärenreservate in der EU auf sehr unterschiedliche Weisen zum Artenschutz und zum Erhalt der Biodiversität beitragen.“

- **UNESCO-Biosphärenreservate** sind Modellregionen, die zum Ziel haben, den Schutz der Natur und ihre Nutzung durch den Menschen unter dem Leitbegriff der Nachhaltigkeit zu vereinen. Sie sind Lernorte für nachhaltige Entwicklung.
- **Nationalparks** sind große Schutzgebiete, die natürliche oder naturnahe Lebensräume und Landschaften langfristig bewahren und für nachkommende Generationen erhalten sollen. Hierzu gehört insbesondere der Schutz biologischer Vielfalt und ökologischer Prozesse. Nationalparks haben daher auch die Aufgabe, Ökosystemdienstleistungen und -güter bereitzustellen, beispielsweise für Forschung und Bildung, Naherholung und Tourismus.
- **Natura 2000-Arten** sind Pflanzen- und Tierarten, die von der Europäischen Union nach fachlichen Kriterien als besonders schützenswert bestimmt wurden. Sie sind in den Anhängen der Vogelschutzrichtlinie (Richtlinie 79/409/EWG) und der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie (Richtlinie 92/43/EWG, kurz FFH-Richtlinie) aufgelistet. Die EU-Mitgliedstaaten sind rechtlich dazu verpflichtet, in regelmäßigen Abständen den Gefährdungsstatus und die Verbreitung dieser Arten an die EU zu berichten. Die aufbereiteten Daten werden von der Europäischen Umweltagentur (EEA), einer Einrichtung der EU, frei zur Verfügung gestellt.

### AUTOREN



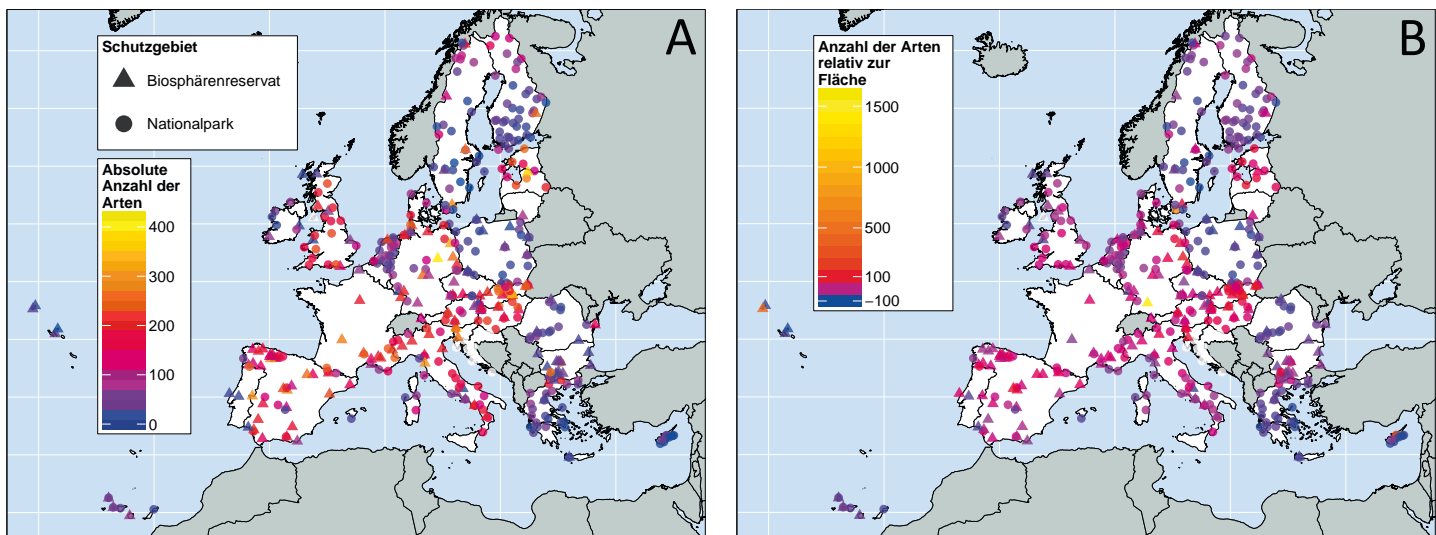
■ Samuel Hoffmann M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Biogeografie an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein ist Inhaber des Lehrstuhls für Biogeografie.



■ Prof. Dr. Alessandro Chiarucci ist Professor für Botanik an der Universität Bologna. Im Rahmen des „International Fellowship Programme“ der Universität Bayreuth hat er an der hier vorgestellten Studie mitgewirkt.



■ **Abb. 1:** Die vier Diversitätsindizes A, B, C und D führen zu sehr verschiedenen Bewertungen der Nationalparks und Biosphärenreservate in der EU. Die Farbskalen zeigen an, wie wertvoll die Schutzgebiete hinsichtlich dieser Biodiversitätskriterien sind. Je höher die Farbe eines Schutzgebiets in der Skala angesiedelt ist, desto wertvoller ist es (Grafiken: Samuel Hoffmann).

weltforschung angewendet werden, um den Grad der Biodiversität einzuschätzen. Für eine Bewertung von Schutzgebieten, die sich an deren Beiträgen zur biologischen Vielfalt orientiert, sind die folgenden Indizes besonders aussagekräftig:

- **Absolute Anzahl der Arten (A):** Je mehr Arten ein Schutzgebiet enthält, desto wertvoller ist es.
- **Anzahl der Arten relativ zur Fläche (B):** Die Größe einer Fläche hat einen erheblichen Effekt auf die Anzahl der darin vorkommenden Arten. Deshalb wurde jedes Schutzgebiet daraufhin untersucht, ob es in Relation zu seiner Fläche mehr oder weniger Arten aufweist als der Durchschnitt aller Schutzgebiete.
- **Seltenheit der Arten (C):** Die Arten kommen nicht gleich häufig vor. Die Forscher haben daher die Arten nach ihrer Seltenheit in Europa gewichtet und für jedes Schutzgebiet eine nach Seltenheit gewichtete Artenzahl ermittelt. Ein Schutzgebiet ist umso wertvoller, je seltener die darin lebenden Arten sind.
- **Seltenheit der Artenzusammensetzung (D):** Jedes Schutzgebiet besitzt ein „Set“ von Arten und ist in dieser Hinsicht anderen Gebieten mehr oder weniger ähnlich. Ein Schutzgebiet mit einer einmaligen Artenzusammensetzung ist wertvoller als ein Schutzgebiet, welches das gleiche oder ein ähnliches „Set“ von Arten enthält wie viele andere Schutzgebiete.

Indem die Bayreuther Studie mit diesen und weiteren Diversitätsindizes gleichzeitig arbeitet, gelangt sie zu einer sehr facettenreichen Bewertung von

Schutzgebieten hinsichtlich der Frage, wie wertvoll und bedeutsam sie für den Artenschutz sind. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass die Nationalparks und Biosphärenreservate in der EU auf sehr unterschiedliche Weisen zum Artenschutz und zum Erhalt der Biodiversität beitragen. Die einen verfügen über viele gewöhnliche Arten, die anderen über wenige seltene. Wieder andere Schutzgebiete enthalten ein „Set“ von Arten, durch das sie sich von den meisten Schutzgebieten unterscheiden. Dabei lässt sich aus der Größe einer Schutzfläche als solcher keine hohe Artenzahl ableiten.

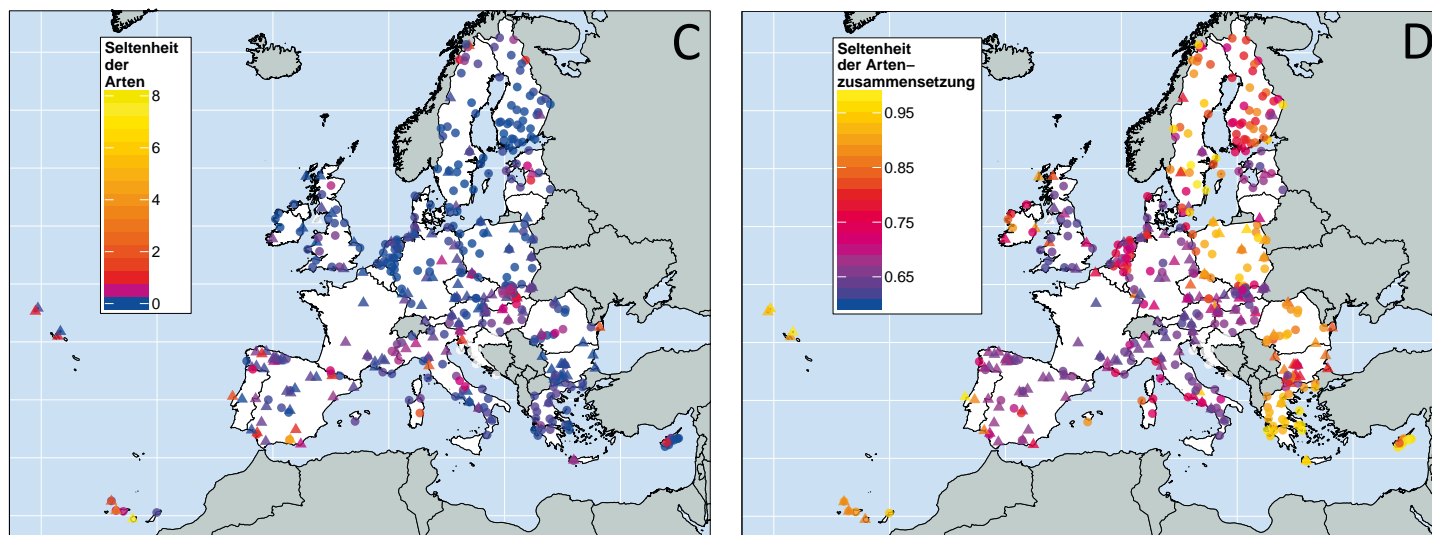
Einzelne Schutzgebiete der EU beherbergen weit- aus mehr Arten, als es im Durchschnitt für ihre Flächengröße üblich ist. Diese Gebiete liegen vor allem in Estland, Litauen, Deutschland, Slowakei, Ungarn, Österreich, Slowenien, Bulgarien und Spanien. In einigen süd- und osteuropäischen Ländern befinden sich Schutzgebiete, die zwar nur eine geringe Anzahl an Arten aufweisen; aber diese Arten kommen in ihrer jeweiligen Kombination nur in wenigen anderen Schutzgebieten der EU vor. Die Schutzgebiete auf Inseln im Atlantik (Azoren, Madeira und Kanarische Inseln) zeigen ein ähnliches Muster. Sie sind darüber hinaus insofern eine Schatzkammer der Biodiversität, als sie viele sehr seltene, zum Teil endemische Arten beherbergen, was aufgrund der isolierten Lage für Insel-Ökosysteme nicht ungewöhnlich ist. Diese und weitere EU-Schutzgebiete im Mittelmeerraum, in Großbritannien, Schweden und Finnland, die nur wenige Arten enthalten, weisen – relativ zu ihrer Fläche – ein Artendefizit auf. Das Verhältnis von Artenzahl zur Flächengröße ist hier geringer als im Durchschnitt aller Schutzgebiete.

Das Projekt der Universität Bayreuth wurde im *Horizon 2020 Research and Innovation Programme* der EU gefördert.

## LITERATURTIPPS

S. Hoffmann, C. Beierkuhnlein, R. Field et al.: Uniqueness of protected areas for conservation strategies in the European Union. *Scientific Reports* (2018), 8 (6445), 1-14. DOI: 10.1038/s41598-018-24390-3.

S. Le Saout, M. Hoffmann, Y. Shi et al.: Protected areas and effective biodiversity conservation. *Science* (2013), 342 (6160), 803-805. DOI: 10.1126/science.1239268.



## Schlussfolgerungen

Die facettenreichen Beiträge, welche die Schutzgebiete in der EU zur Biodiversität leisten, könnten in der Praxis des Natur- und Artenschutzes und auf der politischen Planungsebene zu Konflikten führen. Sind Gebiete mit vielen gewöhnlichen Arten bedeutender und damit schützenswerter als Gebiete mit wenigen seltenen Arten? Sollte bei der Planung und Einrichtung von Schutzgebieten eine möglichst hohe Artenzahl pro Fläche stets Priorität haben, weil die zur Verfügung stehenden Flächen knapp sind? Die neue Studie macht deutlich, dass solche Fragen niemals pauschal und eindimensional nach einem einzigen Kriterium entschieden werden dürfen. Eine verantwortungsbewusste Politik, die den Erhalt der Biodiversität nachhaltig fördern will, muss immer das breite Spektrum der relevanten Diversitätsindizes im Blick behalten. Zudem sollte sie auch weitere Faktoren von vornherein in ihre Konzepte und Planungen einbeziehen – wie zum Beispiel die für ein professionelles Management von Schutzgebieten erforderlichen Ressourcen, regionale und globale Klimaveränderungen, aber auch das Interesse an einer Nutzung von Natur und Landschaft durch den Menschen.

Die Verteilung der Schutzgebiete innerhalb der EU ist derzeit sehr ungleichgewichtig. Manche großflächigen Länder wie Frankreich haben nur wenige Nationalparks und setzen stattdessen auf kleinräumige Schutzzonen und -strategien. Die Niederlande hingegen verfügen über herausragend viele Nationalparks, obwohl die Landesfläche um ein Vielfaches kleiner ist. Eine ausgewogene länderübergreifende

Gestaltung und Vernetzung von Schutzgebieten würde die Effektivität von Naturschutzmaßnahmen steigern. Dies gilt umso mehr, als die heutige Verteilung der Schutzgebiete in der EU nicht immer die Verteilung von Biodiversitäts-Hotspots widerspiegelt. Die neuen Forschungsergebnisse unterstreichen daher auch den Nutzen und die Notwendigkeit, den Artenschutz in Europa großräumig zu koordinieren – nicht zuletzt unter dem Aspekt, dass die zur Verfügung stehenden Finanzmittel effizient einzusetzen und redundante Maßnahmen zu vermeiden sind. Programme und Maßnahmen für den Schutz der Biodiversität sollten daher künftig grenzübergreifend entwickelt werden. Dabei wäre es vorteilhaft, durch bi- und multilaterale Vereinbarungen auch diejenigen europäischen Länder einzubeziehen, die nicht Mitglieder der EU sind. Natürliche Prozesse machen nicht vor politischen Grenzen halt, und allein durch wenige isolierte Schutzgebiete in einzelnen Staaten kann die biologische Vielfalt der Erde auf Dauer nicht bewahrt werden.

## LINKTIPPS

UNESCO-Biosphärenreservate:  
[www.unesco.de/wissenschaft/biosphaerenreservate.html](http://www.unesco.de/wissenschaft/biosphaerenreservate.html)

Die Schutzgebiete unserer Erde:  
[www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net)

Informationen und Karten zum europäischen Natur- und Umweltschutz:  
[www.eea.europa.eu/data-and-maps](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps)

■ Abb. 2: Der Gran Paradiso Nationalpark in den italienischen Alpen bewahrt im Vergleich zu anderen Schutzgebieten in der EU weder deutlich mehr noch seltenere Arten, ist aber äußerst wertvoll für den Schutz des Alpensteinbocks (*Capra ibex*) (Foto: Carl Beierkuhnlein).





LEBENSWELTEN

■ Steven Higgins

# Das wechselnde Pflanzenkleid der Erde

Satelliten erschließen  
neue Wege der  
ökologischen Forschung

■ Die Satellitenaufnahme von einem Gebiet im Südwesten Alaskas, entstanden am 29. September 2017, zeigt eine sehr vielfältige Pflanzenwelt, die stark an Humboldts ungleich gewebten Teppich erinnert (Foto: NASA Earth Observatory).



„Ungleich ist der Teppich gewebt, welchen die blütenreiche Flora über den nackten Erdkörper ausbreitet: dichter, wo die Sonne höher an dem nie bewölkten Himmel emporsteigt, lockerer gegen die trägen Pole hin, wo der wiederkehrende Frost bald die entwickelte Knospe tötet, bald die reife Frucht erhascht. Doch überall darf der Mensch sich der nährenden Pflanzen erfreuen.“<sup>1</sup> Es war Alexander von Humboldt (1769 – 1859), der die Vegetation der Erde in seinen „Ansichten der Natur“ als ein lebendiges, die Erde bedeckendes Textil beschrieb. Humboldts gewebter Teppich, den er auch als Pflanzenkleid bezeichnete, ist natürlich nicht nur schön anzusehen. Heute wissen wir, dass wir dem Pflanzenkleid den Sauerstoff, den wir atmen, die Böden, die wir für den Getreideanbau nutzen, und die fossilen Brennstoffe, mit denen wir unsere Häuser im Winter heizen und unsere Industrien antreiben, zu verdanken haben.

Obwohl Humboldt dazu neigte, blumig zu schreiben, ging es ihm vorrangig um die Entwicklung eines ganzheitlichen Verständnisses der Prozesse, die das Erdsystem gestalten. Humboldt erkannte, dass Pflanzen dabei die Hauptakteure sind. Um seine Entdeckungen und Ideen übersichtlich darzustellen, entwickelte Humboldt Karten, auf denen er zeigte, wie sich die verschiedenen Pflanzenformen in Bezug auf Klima und Boden verteilen. Die Karten beruhen auf empirischen Beobachtungen, die er im Laufe seiner Reisen gesammelt hat, und zugleich auf seinen theoretischen Annahmen. Humboldts kartierte Zonen waren geografische Einheiten, die nicht primär durch Ähnlichkeiten in der Artenzusammensetzung, sondern vor allem durch Ähnlichkeiten in der ökologischen Funktionsweise definiert wurden. In diesem Zusammenhang wies Humboldt darauf hin, dass Botaniker mehr tun müssten, als nur Pflanzen und Pflanzengemeinschaften zu benennen. Nach seiner Ansicht ist es Aufgabe der Botaniker, sich damit auseinanderzusetzen, warum verschiedene Pflanzenarten so verteilt sind, wie sie sind, und darzulegen, wie Pflanzen das gesamte Erdsystem beeinflussen.

### Fernerkundung statt Forschungsreisen

Seit den Tagen Alexander von Humboldts hat die Pflanzenökologie enorme Fortschritte gemacht. Jeden Tag erfassen Erdbeobachtungssatelliten die gesamte Landoberfläche und enthüllen Aspekte des Pflanzenkleids, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Es ist nicht mehr erforderlich, ein wohlhabender Adelige mit einer Begeisterung für

abenteuerliche Reisen zu sein, um das Pflanzenkleid zu beobachten. Heute können wir, ohne das Büro zu verlassen, die Informationen direkt von der NASA oder der ESA kostenlos herunterladen. Wir verfügen auch über eine beispiellose Rechenleistung, um die Datenberge zu verarbeiten, die Satelliten so fleißig für uns sammeln. Mit diesen Unmengen von Daten und großen Computern würde man erwarten, dass wir Humboldts Wissensdrang längst gerecht geworden sind. Die Wahrheit ist leider, dass wir dem von Humboldt angestrebten ganzheitlichen Verständnis der Rolle des Pflanzenkleids für das Funktionieren des Erdsystems nur in kleinen Schritten näherkommen.


---

**„Pflanzen haben die Erde in den letzten Jahrzehnten vor einem weitaus dramatischeren Klimawandel bewahrt.“**

Es gibt natürlich viele Vegetationskarten, die Theorien darüber abbilden, wie und warum das Pflanzenkleid so gemustert ist, wie es ist. Erdbeobachtungssatelliten haben uns jedoch in den letzten Jahren neue Möglichkeiten eröffnet, den Nutzen solcher Karten zu testen. Zum Beispiel besagt eine gut etablierte Theorie, dass Chaparral, Maquis, Fynbos, Kwongan und Matorral zu einer Familie von Ökosystemen namens „Mediterrane Ökosysteme“ gehören. Die jüngsten Arbeiten haben jedoch gezeigt, dass sich das Klima in diesen Regionen unterscheidet.<sup>2</sup> Das heißt, die Tatsache, dass diese mediterranen Ökosysteme ähnliche Pflanzenformen haben, verdeckt Unterschiede in ihrer ökologischen Funktionsweise. Tatsächlich haben auch Arbeiten in den Savannen gezeigt, dass sich tropische Savannen auf verschiedenen Kontinenten, obwohl sie in ihrer Form ähnlich sind, in ihrer Funktionsweise deutlich unterscheiden: Afrikanische Savannen werden von Temperaturanstiegen profitieren, während ihre südamerikanischen und australischen Pendanten darunter leiden werden.<sup>3</sup> Diese Ergebnisse zeigen, dass Vegetation mit ähnlicher Gestalt nicht in ähnlicher Weise funktionieren muss (Abb. 1 und 2).

Gerade angesichts des derzeitigen beispiellosen Klimawandels hat die Forschung ein starkes Interesse daran, die Erdoberfläche in ökologische Zonen einzuteilen, die jeweils in ähnlicher Weise auf veränderte klimatische Bedingungen reagieren. Wir wissen bereits, dass die bewachsene Landoberfläche ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlenstoffemissionen aufnimmt. Pflanzen haben die Erde daher in den letzten Jahrzehnten vor einem weitaus

AUTOR



■ Prof. Dr. Steven Higgins ist Inhaber des Lehrstuhls für Pflanzenökologie an der Universität Bayreuth.

## LITERATURTIPPS

R. Buitenwerf, L. Rose, S. I. Higgins: Three decades of multi-dimensional change in global leaf phenology. *Nature Climate Change* (2015), 5, 364-368. DOI: 10.1038/nclimate2533.

S. I. Higgins, R. Buitenwerf, G. R. Moncrieff: Defining functional biomes and monitoring their change globally, in: *Global Change Biology* (2016), 22, 3583-3593. DOI: 10.1111/gcb.13367.

dramatischeren Klimawandel bewahrt. Aber wir wissen nicht, welche Ökosysteme der Erde hauptsächlich zu genau *dieser* Kohlenstoff-Aufnahme beitragen. Ebensowenig können wir mit Gewissheit sagen, wann die Fähigkeit dieser Ökosysteme zur Kohlenstoff-Aufnahme erschöpft sein wird. Die Ökologie ist deshalb in den nächsten Jahrzehnten herausgefordert, präzise Einschätzungen darüber zu gewinnen, welche Kohlenstoffmengen beispielsweise von Steppen, Savannen oder von tropischen Regenwäldern aufgenommen werden können. Das ist jedoch nicht so einfach, wenn wir unsicher sind, wo die Steppe endet und die Savanne beginnt, oder ob die mongolische Steppe in ihrer Funktionsweise vergleichbar ist mit der nordamerikanischen Prärie.

Um die noch ungelösten Fragen der Muster und Funktionen des Pflanzenkleides aufzuklären, haben Ökologen in jüngster Zeit begonnen, Satellitendaten auf neue Weise zu nutzen. Die von Satelliten erfassten Reflexionsmuster zeigen, wieviel Sonnenlicht und Kohlenstoff täglich von einem Ökosystem aufgenommen wird. Darüber hinaus können wir feststellen, inwieweit die Fähigkeit eines Ökosystems, Kohlenstoff aufzunehmen, hauptsächlich durch tiefe Temperaturen oder durch mangelnde Niederschläge begrenzt wird. Diese und weitere Erkenntnisse bilden eine Grundlage, um die Vegetationen der

Erde in einer Weise zu klassifizieren, die Humboldt wahrscheinlich gefallen hätte: nicht nach den Namen der darin vorkommenden Pflanzenarten, sondern nach ihren ökologischen Funktionen.<sup>4</sup> Der besondere Reiz satellitenbasierter Vegetationskarten liegt darin, dass sie auf öffentlich verfügbaren Daten und transparenten Regeln basieren. Frühere Karten stützten sich stark auf Expertenwissen, und die Ergebnisse waren oft widersprüchlich.

## Neue Erkenntnisse zur Dynamik des Pflanzenkleids

Die Techniken der Fernerkundung bieten überdies eine transparente Methode zum Monitoring von Veränderungen in Ökosystemen. So haben Analysen von Satellitendaten beispielsweise ergeben, dass sich 13 Prozent des Pflanzenkleids der Erde heute in einem anderen funktionellen Zustand befinden als im Jahr 1982.<sup>5</sup> Einige Regionen sind jetzt in einem produktiveren Zustand, in manchen Regionen wird das Wachstum der Pflanzen nicht mehr primär durch niedrige Temperaturen beschränkt; in anderen Regionen wird das Wachstum anders als früher durch Bodenfeuchtigkeit begrenzt. Es ist also heute möglich, Ökosysteme nicht allein nach bestehenden Eigenschaften zu klassifizieren, sondern auch danach,

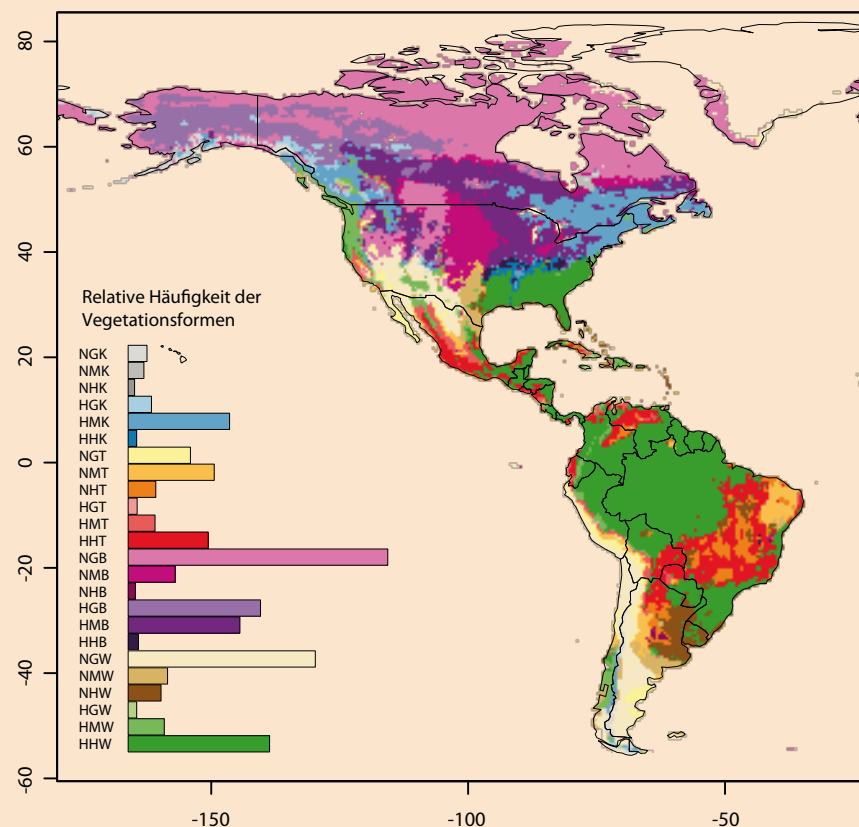
Links: Eine Weltkarte der Vegetationen, die auf aktuellen Satellitenbeobachtungen basiert. Die von Satelliten gelieferten Daten betreffen die Produktivität der Vegetationen und das Ausmaß, in dem die Aktivität der Pflanzen durch Trockenheit und Kälte begrenzt ist.

Rechts: Änderungen der Vegetation der Welt von 1982 bis 2012. Die Grafik berücksichtigt nur diejenigen Vegetationstypen, die sich in dieser Zeitspanne geändert haben. Die linke Achse zeigt für jeden Vegetationstyp im Jahr 1982 an, welcher prozentuale Anteil sich bis 2012 in andere Vegetationstypen entwickelt hat. Die rechte Achse zeigt den Endzustand im Jahr 2012.

Die Unterscheidung zwischen den dargestellten Vegetationstypen beruht auf drei Kriterien, die durch die drei Buchstaben in der jeweiligen Abkürzung repräsentiert werden:

- (1) Höhe der Vegetation: niedrig (N) oder hoch (H)
- (2) Produktivität der Vegetation: gering (G), mittel (M), hoch (H)
- (3) Saisonale Begrenzungen des Wachstums: Trockenzeiten (T), Kältezeiten (K), Trocken- und Kältezeiten (B), keine Saisonalität des Wachstums (W).

Beispiel: die Abkürzung NGB bezeichnet eine niedrige Vegetation mit geringer Produktivität, deren Wachstum sowohl durch Trocken- als auch durch Kälteperioden begrenzt ist.





■ Abb. 1 (links): Miombo-Savanne in Afrika, dominiert von Hülsenfrüchtlern (Fabaceae) (Foto: Geoff Gallice / wikimedia commons / CC-BY-2.0).

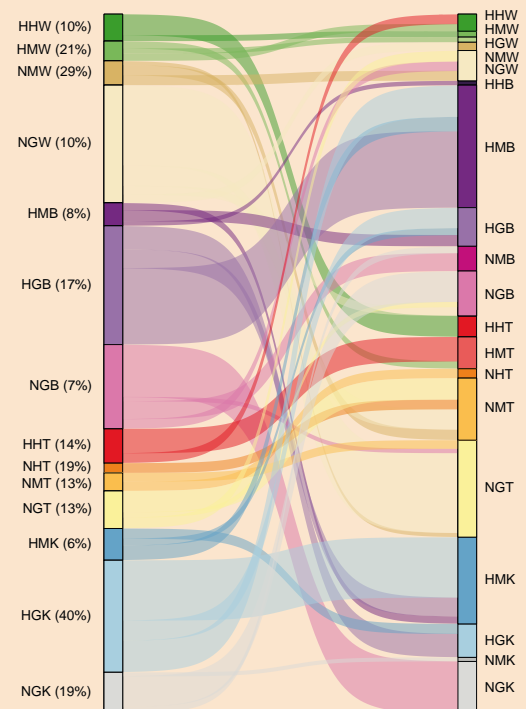
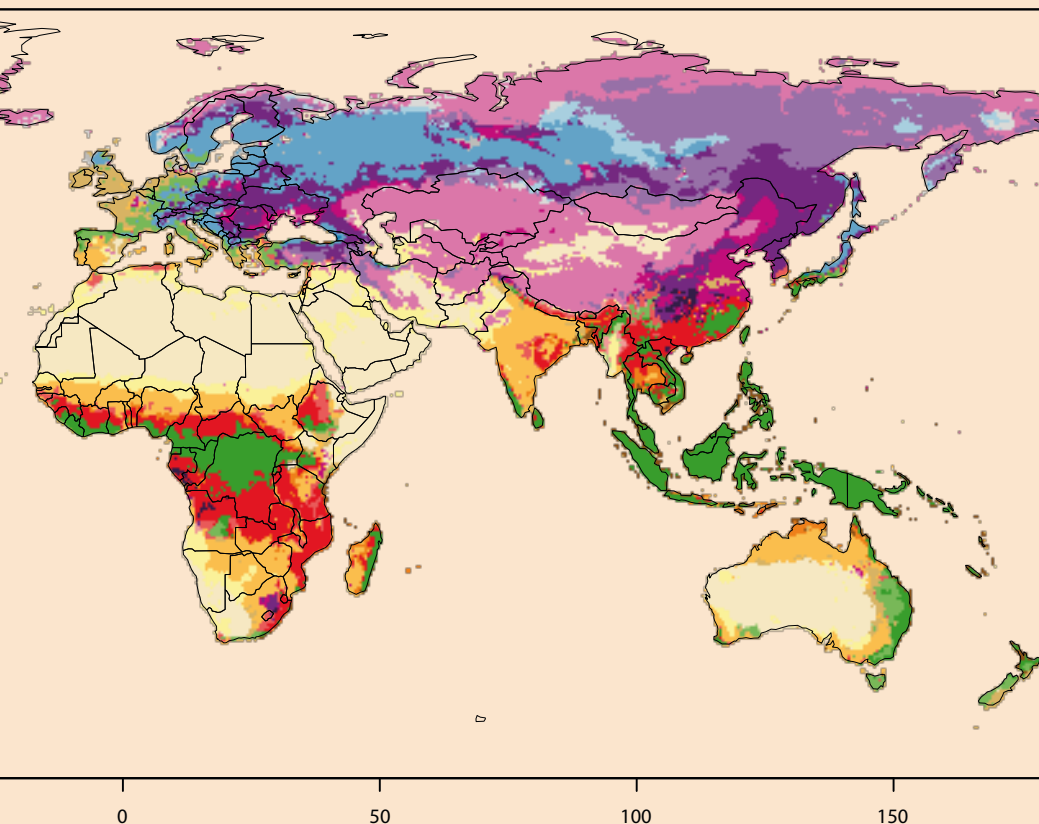
■ Abb. 2 (rechts): Savanne in Australien, dominiert von Myrtengewächsen (Myrtaceae). Ähnliche Umweltbedingungen haben zu einem ähnlichen Erscheinungsbild dieser verschiedenen Pflanzenfamilien geführt. In beiden Landschaften haben sich die Bäume an Trockenheit und Feuer angepasst. Aber trotz ihrer äußeren Ähnlichkeit zeigen diese Vegetationen ganz unterschiedliche ökologische Reaktionen auf Klimaänderungen (Foto: Steven Higgins).

auf welche Weise sich die Änderungen vollzogen haben.<sup>6</sup> Auf dieser Basis entwickelte Vegetationskarten können uns vor Augen führen, welche Ökosysteme besonders viel zur Kohlenstoff-Aufnahme beigetragen haben. Die hohe zeitliche Auflösung der Satellitenbilder erlaubt es uns, nicht nur die Vergangenheit des Pflanzenkleids zu interpretieren, sondern auch aktuelle Veränderungen zu beobachten, was uns wiederum in die Lage versetzt, Frühwarnsysteme für Ökosystemveränderungen zu entwickeln.

Wenn die Satellitentechnik eine so zentrale Bedeutung für die globale Erforschung von Ökosystemen gewonnen hat, sollten die Ökologen diese Aufgabe

dann nicht ganz den Fachleuten für Fernerkundung überlassen? Ein solcher Vorschlag erinnert ein wenig an ein Bonmot des Mathematikers David Hilbert: „Die Physik ist für die Physiker eigentlich viel zu schwer“. Die Antwort auf unsere Frage lautet natürlich, dass der Fortschritt in der Wissenschaft in erster Linie von Neugier und Kreativität, nicht von Technologien angetrieben wird. Aber neue Technologien können der Forschung neue Wege erschließen. Um das Rätsel des sich verändernden Pflanzenkleids der Erde zu lösen, bedarf es dabei einer wahrhaft interdisziplinären Zusammenarbeit. Alexander von Humboldt hat sie zu seiner Zeit bereits vorweggenommen. Heute würde er sie tatkräftig unterstützen.

- 1 A. von Humboldt: Ansichten der Natur. Tübingen 1808.
- 2 G. R. Moncrieff, T. Hickler, S. I. Higgins: Intercontinental divergence in the climate envelope of major plant biomes. *Global Ecology and Biogeography* (2015), 24, 324-334. DOI: 10.1111/geb.12257.
- 3 C. E. R. Lehmann, T.M. Anderson, M. Sankaran et al.: Savanna vegetation-fire-climate relationships differ among continents. *Science* (2014), 343, 548-552. DOI: 10.1126/science.1247355.
- 4 S. I. Higgins, R. Buitenwerf, G. R. Moncrieff (2016): siehe Literaturtipps.
- 5 Vgl. ebd.
- 6 R. Buitenwerf, L. Rose, S. I. Higgins (2015): siehe Literaturtipps.



■ Abb. 3 und 4: aus Steven Higgins et al.: *Global Change Biology* 2016, 22 (s. Literaturtipps).

# Grünland- verluste – was bedeutet das für uns?

Zum Rückgang des Grünlands  
in Bayern und seinen Folgen



■ *Mit der Umwandlung von Grünland in Ackerland, in der Landwirtschaft als „Umbruch“ bezeichnet, geht der Lebensraum für viele Arten verloren. Doch auch die Art der Nutzung ist entscheidend. Düngesensible Pflanzen oder gefährdete Insekten findet man in der Regel nur auf extensiv bewirtschaftetem Grünland (großes Foto: pxb / kleines Foto: wiki-media commons / Nadalo / CC-BY-SA-3.0).*

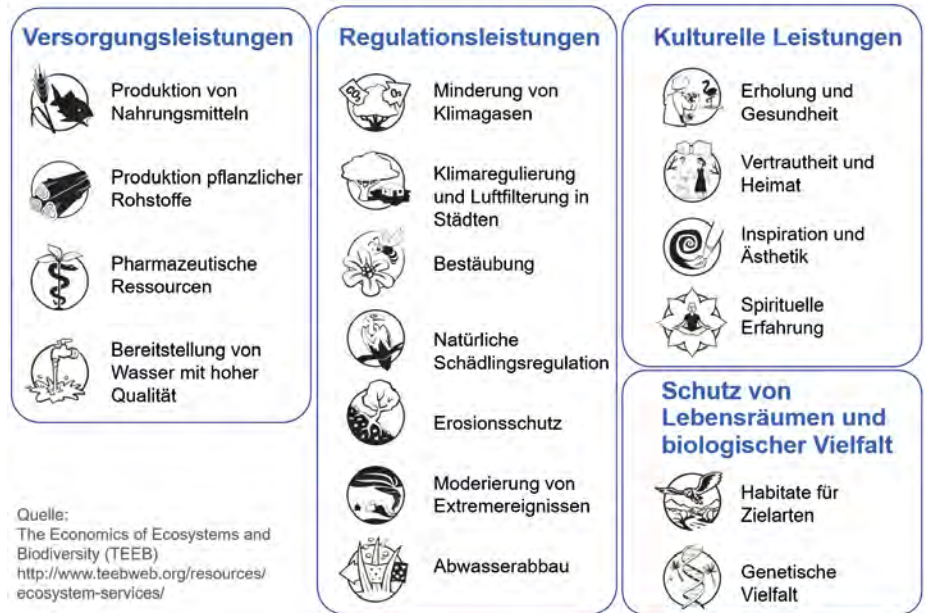
Fast alle Ökosysteme der Erde sind mehr oder weniger stark vom Menschen beeinflusst. Gleichzeitig tragen sie auf die eine oder andere Weise zum menschlichen Wohlergehen bei. Daher gibt es sowohl weltweite als auch regionale Wechselwirkungen, die als Mensch-Umwelt-Systeme beschrieben werden. Ökosystemleistungen, die vielfältigen Leistungen der Natur für Menschen, stehen dabei im Zentrum. Sie werden kategorisiert und, soweit dies mit wissenschaftlichen Verfahren möglich ist, quantifizierbar gemacht. Bewährt hat sich dabei die Unterscheidung zwischen Versorgungsleistungen, Regulationsleistungen, kulturellen Leistungen und solchen Leistungen, die dem Schutz von Lebensräumen und biologischer Vielfalt dienen (Abb. 1).

Aus verschiedenen Ökosystemleistungen können Synergieeffekte hervorgehen, aber auch Zielkonflikte sind möglich. So können beispielsweise die Versorgungsleistungen „Trinkwasserqualität“ und „Nahrungsmittelanbau“ in Gebieten mit stark industriell geprägter Landwirtschaft konkurrieren. Oft schränken Versorgungsleistungen, die aus intensivem Ackerbau resultieren, die übrigen Ökosystemleistungen ein. Innovative Anbaukonzepte versuchen jedoch, hohe landwirtschaftliche Produktivität und einen möglichst weitgehenden Erhalt anderer Leistungen zu verbinden. In anderen Fällen kann die Pflege von Landschaften, die für den Menschen in ästhetischer und kultureller Hinsicht wertvoll sind, mit dem Erhalt von Lebensräumen für gefährdete Tier- und Pflanzenarten in Konflikt geraten. Das Konzept der Ökosystemleistungen kann helfen, Landnutzung optimal nach gesellschaftlichen Bedürfnissen zu gestalten und sich der Konsequenzen von Entscheidungen bewusst zu sein.

### Der Wert von Grünland für uns

Grünlandflächen dienen zur Produktion von Futtermitteln. Zusätzlich leisten sie, im Vergleich mit Ackerland, einen größeren Beitrag zu weiteren Ökosystemleistungen. Grünland spielt eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Trinkwasser, weil es Schadstoffe und überschüssige Düngemittel ausfiltert. Aufgrund der ständigen Bodenbedeckung ist zudem ein hoher Erosionsschutz an Hängen gewährleistet: Das Erdreich wird nicht mit dem Regen abtransportiert. So bleiben die Böden fruchtbar, und Gewässer werden nicht durch verlagerte Erde beeinträchtigt. Zugleich trägt Grünland zur Regulierung von Hochwasser und damit zum Katastrophenschutz bei. Es ist bei Starkregen

## Vielfalt der Ökosystemleistungen



in der Lage, im Vergleich mit Ackerland etwa 20 Prozent mehr Wasser zurückzuhalten.

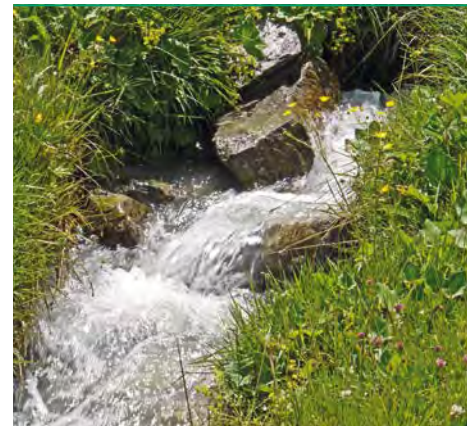
Auch bei der Regulation des globalen Klimas spielt Grünland eine große Rolle. Weltweit befindet sich in Böden doppelt so viel Kohlenstoff wie in der Atmosphäre. Flächen, die als Grünland genutzt werden, enthalten in Mitteleuropa im Durchschnitt mehr als zweimal so viel organischen Kohlenstoff im Boden wie Ackerflächen. Werden sie in Ackerland umgewandelt, wird der darin enthaltene Kohlenstoff in den Folgejahren als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre freigesetzt, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

Darüber hinaus haben Grünlandflächen auch wegen ihrer biologischen Ökosystemleistungen eine große Bedeutung für den Menschen. Sie ermöglichen die Bestäubung von Pflanzen, unterstützen die natürliche Schädlingsregulation und bieten Lebensraum für seltene Arten. Gerade extensiv genutzte Grünlandflächen zeichnen sich durch eine sehr hohe Biodiversität aus. Sie gehören zu den artenreichsten Kulturlandschaften in Europa.

Ein anschauliches Beispiel für die kulturellen Leistungen von Grünland ist die Almwirtschaft im bayerischen Voralpenland. Grünlandflächen tragen hier erheblich zum kulturellen Selbstverständnis bei, das in vielen Regionen auch touristisch vermarktet wird.

■ Abb. 1: Die systematische Unterscheidung von Ökosystemleistungen unterstützt Entscheidungen über die Nutzung naturnaher oder landwirtschaftlicher Flächen. Im Hinblick auf die dadurch geförderten oder geschwächten Ökosystemleistungen können verschiedene Optionen miteinander verglichen werden. Auch Projektionen in die Zukunft, beispielsweise unter Berücksichtigung des Klimawandels, sind möglich und unterstützen weitsichtige Nutzungsentscheidungen (Grafik: Thomas Koellner).

■ Abb. 2: Auch für die Ökosystemleistung „Bereitstellung von Wasser mit hoher Qualität“ spielt Grünland eine wichtige Rolle (pxb).



## LITERATURTIPPS

Naturkapital Deutschland – TEEB DE: Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – Eine Einführung. Ifuplan, München; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig; Bundesamt für Naturschutz, Bonn 2012.

Naturkapital Deutschland – TEEB DE: Ökosystemleistungen in ländlichen Räumen – Grundlage für menschliches Wohlergehen und nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung. Schlussfolgerungen für Entscheidungsträger. Leibniz Universität Hannover, Hannover; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig 2016.

■ Abb. 3 und 4: Grafiken: Maria Hänsel, auf der Basis einer von der Bayerischen Vermessungsverwaltung erstellten Karte der Gemeinden in Bayern. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts AgentDNDC hatte der Urheber u.a. Daten zur landwirtschaftlichen Nutzung (InVeKoS), ein digitales Höhenmodell und die bayerischen Natura 2000-Flächen zur Berechnung genutzt.

## Grünland in Bayern rückläufig: Die Gründe

In Deutschland sind seit den 1990er Jahren mehr als zehn Prozent der Dauergrünlandflächen verschwunden – vor allem deshalb, weil sie in Siedlungsflächen oder in Ackerland umgestaltet wurden. Besonders stark ist der Rückgang in Bayern ausgeprägt. Hier haben Grünlandflächen in den letzten vier Jahrzehnten um etwa 15 Prozent abgenommen. Die Verluste waren dabei regional sehr unterschiedlich verteilt. Besonders betroffen waren beispielsweise Teile der Regierungsbezirke von Schwaben und Oberbayern. Seit 2014 muss die Umwandlung von Grünland in Ackerland in Bayern von den dafür zuständigen Landwirtschaftsämtern genehmigt werden und ist mit strikten Auflagen verbunden. Die gemeinsame EU-Agrarpolitik hatte festgelegt, dass eine Genehmigungspflicht eingeführt werden muss, sobald sich der Anteil des Grünlands an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche gegenüber dem Referenzjahr 2003 um mehr als fünf Prozent verringert. Dies war 2014 der Fall.

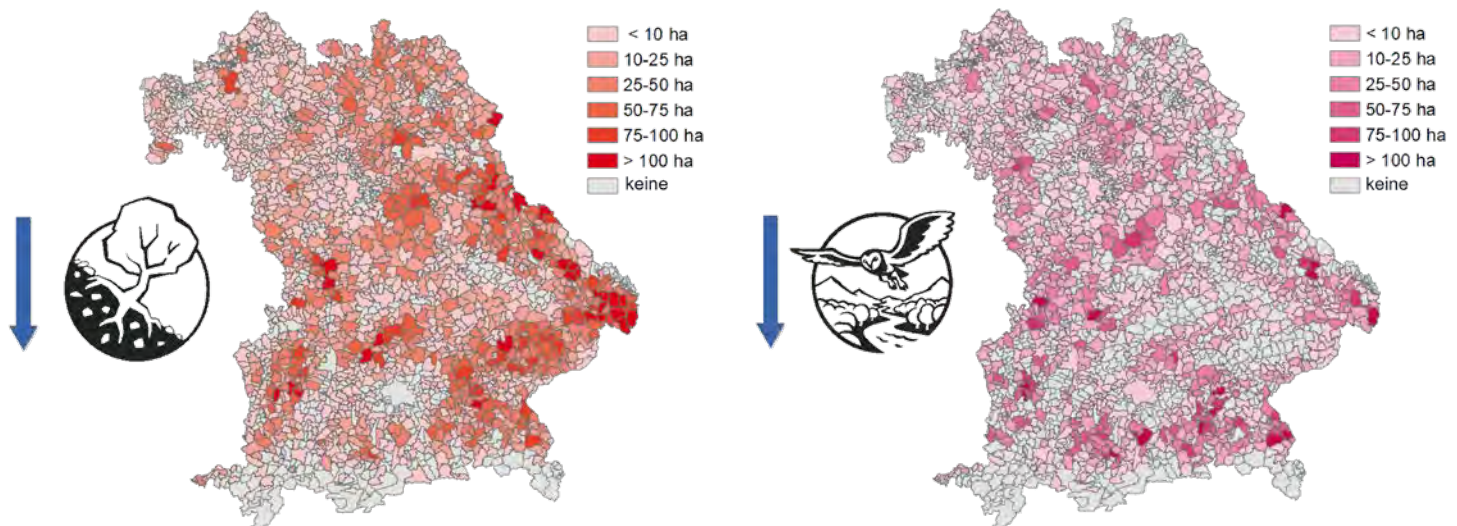
Die Gründe für den Verlust von Grünland sind vielfältig. Die wichtigste Triebkraft in Bayern, dem Bundesland mit dem größten Milchkuhbestand, sind Änderungen in der Nutztierhaltung. Bis heute ist die Rinderhaltung in Deutschland eng mit der Nutzung von Grünland verknüpft. Weil die Milchleistung und der Fleischansatz der Kühe immer weiter gesteigert werden konnten, haben die Landwirte – um Überproduktion zu vermeiden – die Anzahl der Tiere stark verringert und die Milchkuhbestände auf weniger Betriebe konzentriert. Zudem enthält das Futter der

Tiere heute einen weitaus höheren Anteil von nährstoffreichem Kraftfutter, das durch Ackerbau gewonnen wird. Alle diese Faktoren haben dazu geführt, dass die Anzahl der Flächen, die als Grünland profitabel bewirtschaftet werden können, gesunken ist. Internationale Konkurrenz und fallende Milchpreise haben diese Entwicklung verstärkt.

Auch die Fördermechanismen der Biogasproduktion haben zum Rückgang des Grünlands beigetragen. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat besonders in der Förderperiode 2004 - 2011 den Anbau von Mais, der in Biogasanlagen als Gärsubstrat eingesetzt wird, bundesweit finanziell attraktiv gemacht. Daher hat man in dieser Zeit auch in Regionen, in denen die Tierbestände nicht verringert wurden, Grünland in Ackerflächen für den Maisanbau umgewandelt.

Zudem waren die EU-Subventionen für Grünland bis vor wenigen Jahren in Bayern deutlich niedriger als die für Ackerland. Im Förderzeitraum 2005 - 2013 belief sich der reguläre Zahlungsanspruch für Grünland auf 89 Euro pro Hektar, für Ackerland jedoch auf 289 Euro pro Hektar. Dies war ein Anreiz für Landwirte, Grünland vor dem Verkauf in Ackerland umzuwandeln. Erst mit der letzten EU-Agrarreform wurden Ende 2013 einheitliche Zahlungen für Acker- und Grünlandflächen eingeführt.

Die Entwicklung der Pachtpreise in Deutschland zeigt, dass Grünland zunehmend weniger attraktiv ist als Ackerland. Insgesamt sind die Pachtpreise stark gestiegen, die Unterschiede zwischen den Nutzungsarten haben sich dabei jedoch ausgeweitet



Geschätzte Verluste der Ökosystemleistung „Erosionsschutz“ (links) und der Ökosystemleistung „Bereitstellung von Habitaten für Zielarten“ (rechts), jeweils in Bayern von 2005 bis 2013. Für jede Gemeinde wurde ermittelt, wieviele Flächen mit einer Hangneigung von über acht Prozent und wieviele Flächen in Natura 2000-Gebieten von Grünland in Ackerland umgewandelt wurden.



statt angeglichen. Im Jahr 2016 erzielten die Landwirte mit der Verpachtung von Grünland im bundesweiten Durchschnitt nur noch etwa halb so viele Einnahmen wie mit der Verpachtung von Ackerland.

### Ökosystemleistungen unter Druck: Zwei Beispiele aus Bayern

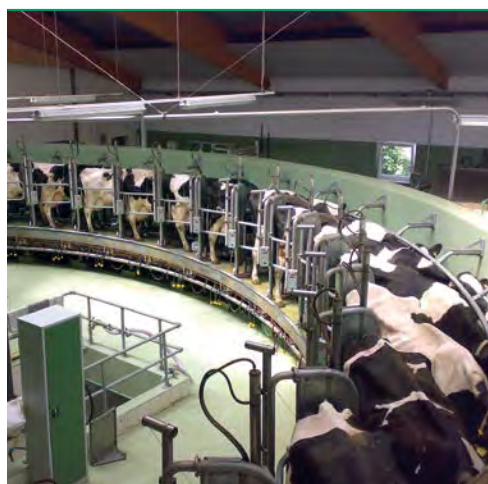
Durch die Umwandlung von Grünland in Ackerland werden zahlreiche Ökosystemleistungen eingeschränkt. Diese Entwicklung lässt sich heute quantitativ einordnen: Georeferenzierte Daten zur Nutzung landwirtschaftlicher Flächen machen es möglich, Änderungen der Nutzung bis in die einzelnen Parzellen hinein zu überprüfen. Die Daten stammen aus den bayerischen Landwirtschaftsbehörden und stehen seit 2005 digital zur Verfügung. Wenn sie mit weiteren Datensätzen verschnitten werden, lassen sich Änderungen der Ökosystemleistungen anhand bestimmter Hilfsgrößen abschätzen.

- **Beispiel Bodenerosion:** Grünland garantiert, wenn der Boden vollständig bewachsen ist, einen umfassenden Schutz. Für Ackerflächen steigt hingegen ab einer Hangneigung von acht Prozent das Erosionsrisiko. Werden also Grünlandflächen an Hängen in Ackerland umgewandelt, geht die Ökosystemleistung Erosionsschutz verloren. Hangneigung dient in diesem Fall als eine Hilfsgröße zur Analyse des verringerten Schutzes. In Bayern waren in den Jahren 2005 bis 2013 besonders die östlichen Regionen davon betroffen (Abb. 3).
- **Beispiel Artenschutz:** Mit ihrem Programm „Natura 2000“ hat die EU ein europaweites Netzwerk von Schutzgebieten geschaffen. Zahlreiche Flächen in bayerischen Natura 2000-Gebieten wurden in den Jahren 2005 bis 2013 von Grünland in Ackerland umgebrochen (Abb. 4). In der Regel ist davon auszugehen, dass Lebensraum für schutzwürdige Arten verlorengegangen ist oder sich qualitativ verschlechtert hat. In den meisten Fällen lässt sich die Qualität des Lebensraums nicht innerhalb kurzer Zeit wiederherstellen.

### Die Zukunft von Grünland in Bayern

Mit der 2014 eingeführten Genehmigungspflicht des Grünlandumbruchs in Ackerland ist ein wichtiger Schritt für den Schutz von Grünland in Bayern getan. Allerdings gibt es noch immer Hürden, die der Ausweitung von Grünland entgegenstehen. Landwirte müssen strikte Regelungen einhalten, wenn sie ehemals als Grünland bewirtschaftete Flächen in Ackerland umgebrochen haben und diese Entscheidung wieder rückgängig machen wollen. Sie müssen in diesem Fall beachten, dass eine spätere erneute Umwandlung von Grünland in Ackerland unter rechtlichen Aspekten erst recht schwierig wird. Der Bundesgerichtshof hat 2017 sogar entschieden, dass ein Pächter schadensersatzpflichtig ist, wenn er gepachtetes Ackerland als Grünland bewirtschaftet. Um die extensive Bewirtschaftung von Grünland attraktiver zu machen, gibt es in Bayern Förderprogramme, aus denen Landwirte weitere Gelder erhalten, wenn sie bestimmte Auflagen erfüllen, zum Beispiel keinen Kunstdünger verwenden oder einen späten Mahdzeitpunkt einhalten.

Der wirtschaftliche Druck auf Grünland bleibt dennoch bestehen, nicht zuletzt durch den Bedarf an zusätzlichen Siedlungsflächen. Es bleibt daher abzuwarten, ob die bestehenden Regelungen und Kompensationsmechanismen ausreichen, um Grünland dauerhaft zu schützen. Sollten sich in Zukunft die aktuellen Trends der Tierhaltung umkehren – hin zu mehr Weidenutzung, weniger importierten Futtermitteln und geringeren Anteilen an Kraftfutter – könnte Grünland auch ökonomisch wieder attraktiver werden. Dies würde allerdings ein stärker ökologisch ausgerichtetes Verbraucherverhalten und eine nachhaltige Steuerung durch die Politik voraussetzen.



## „Extensiv genutzte Grünlandflächen gehören zu den artenreichsten Kulturlandschaften in Europa.“

■ Abb. 5: Traditioneller Almabtrieb im Allgäu, ein Beispiel für die kulturellen Leistungen von Grünland (Foto: Almpixel / pxb).

### AUTOREN



■ Maria Hänsel M.Sc. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur für ökologische Dienstleistungen an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Thomas Koellner ist Professor für ökologische Dienstleistungen.

■ Abb. 6: Moderne Technologien, wie hier ein Melkkarussell, prägen heute die Milchwirtschaft. Hochleistungskühe sind auf einen hohen Anteil von Kraftfutter angewiesen (Foto: wikimedia commons / Gunnar Richter / CC-BY-SA-3.0).



■ Christoph Thomas

# Wetter- und Klimaforschung verbindet

Forschungsnetzwerke in Oberfranken und Afrika

■ In dem vom Europäischen Forschungsrat (ERC) geförderten Projekt DarkMix erforscht die Bayreuther Mikrometeorologie das nächtliche Wettergeschehen, insbesondere Temperaturschwankungen, Luftströmungen und Wärmetransporte. Moderne Forschungstechnologien, wie hier eine Messeinrichtung aus optischen Glasfasern in Corvallis, Oregon/USA, sind der Schlüssel zu einer hohen Präzision räumlich aufgelöster Messungen (Foto: Christoph Thomas).



Wetter – was ist das eigentlich? Meteorologisch gesprochen: der Ist-Zustand der bodennahen Erdatmosphäre. Und das Klima? Nichts anderes als Wetter – beobachtet über einen Zeitraum, der lang genug ist, um mittlere Zustände von Temperatur, Feuchte, Niederschlag, Luftdruck, Luftströmung und Sonnenstrahlung von deren Abweichungen mit hoher Gewissheit unterscheiden zu können. Die internationale Fachwelt ist sich heute darin einig, dass es dazu eines Zeitraums von mindestens 20 bis 30 Jahren bedarf. Die Klimaforschung beruht deshalb immer auf genauen Wetterbeobachtungen mit Messinstrumenten, deren hohe Qualität über einen langen Zeitraum gewährleistet sein muss. Für diese anspruchsvolle Aufgabe engagiert sich die Universität Bayreuth gemeinsam mit Forschungspartnern im In- und Ausland: lokal in Oberfranken, international in Afrika südlich der Sahara.

## Klimawandel in Bayreuth

In Bayreuth sind wir in einer äußerst guten Ausgangslage, um den Wandel des Klimas untersuchen zu können. Die instrumentellen Wetterbeobachtungen lassen sich hier bis zum Jahr 1850 zurückverfolgen. Zwar gab es die Mikrometeorologie und die Universität Bayreuth damals noch nicht, aber durch das sorgfältige statistische Aneinanderfügen von Beobachtungen aus verlässlichen Quellen ist es Bayreuther Forschern gelungen, eine für Nordbayern einzigartige Wetterzeitreihe zusammenzutragen.<sup>1</sup>

Ganz Europa befindet sich mitten im Klimawandel. Was die Klimaerwärmung betrifft, nehmen Bayern und Deutschland im weltweiten Vergleich eine Spitzenposition ein: Seit 1881 ist der Mittelwert der in zwei Metern über der Erdoberfläche gemessenen Lufttemperatur um 1,5 Grad Celsius angestiegen: Verglichen mit dem Weltdurchschnitt von 0,9 Grad ist dies fast eine Verdopplung.<sup>2</sup> In Bayreuth lag die durchschnittliche Jahrestemperatur seit 1988 oberhalb des Mittelwerts von 7,3 Grad Celsius im Referenzzeitraum 1961 bis 1990; nur das Jahr 1996 bildete dabei eine Ausnahme. Im Spitzenjahr 2014, dem bislang wärmsten Jahr seit Aufzeichnungsbeginn, betrug der Temperaturanstieg 2,6 Grad, dicht gefolgt von 2,4 Grad im Jahr 2015. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass seit 1850 acht der zehn wärmsten Jahre und sieben der zehn wärmsten Monate in Bayreuth während der letzten 25 Jahre aufgetreten sind. Es gibt hier keinen Monat mehr, dessen mittlere Lufttemperatur weniger als 0 Grad Celsius beträgt und somit Dauerfrost bieten



■ Abb. 1: Mit Hilfe von Nebel und Licht kann man die bodennahe Luftströmung nachts sichtbar machen. Hier im Bild strömt Kaltluft hangabwärts und kann sich in Mulden sammeln. Pflanzen und Menschen reagieren empfindlich auf diese „Kaltluftseen“. Bodennebel, Frostschäden und erhöhte Luftschadstoffbelastung sind typische Folgen (Foto: Christoph Thomas).

kann – und das im eher kühlen und regenreichen Oberfranken. Die Statistik der klimatologischen Kenntage bestätigt den starken Klimawandel in Bayreuth: Die Zahl der Eis- und Frosttage sank in den letzten 50 Wintern um bis zu drei Tage pro Monat – mit Ausnahme des Aprils, der eine Tendenz zu weniger Bewölkung und mehr Nachtfrost zeigte. Die Zahl der Sommertage stieg hingegen deutlich um bis zu vier Tage, die der heißen Tage moderat um einen Tag. Tropische Nächte mit einer Minimumtemperatur von über 20 Grad Celsius spielen allerdings in Bayreuth weiterhin keine Rolle.

Diese Beobachtungen bestätigen, dass sich die Erwärmung überall in Europa spürbar geändert hat: Am Ende des 20. Jahrhunderts beschränkte sich die signifikante Erwärmung noch auf die Wintermonate und wirkte sich somit vor allem auf die Schnee- und Eisdynamik aus. Seither aber sind die Temperaturen das ganze Jahr über gestiegen. Daher kommt es vor allem im Frühjahr und Sommer zu einem Anstieg der Verdunstung und zu größerer Trockenheit.

Am deutlichsten fällt die Wasserknappheit im April aus. Seit 1990 sind die Niederschläge in diesem Monat, der für die Landwirtschaft eine Schlüsselrolle hat, gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 um durchschnittlich 25 Prozent gesunken. Zudem lässt sich eine deutliche jahreszeitliche Verschiebung feststellen: Im Winter und Frühjahr sind die Niederschläge um 3 bzw. 15 Millimeter gesunken, im Sommer und Herbst um 16 bzw. 6 Millimeter angestiegen (1 Millimeter Wassersäule bedeutet 1 Liter pro Quadratmeter). Der von den Pflanzen tatsächlich nutzbare Zugewinn im Sommer fällt allerdings wesentlich geringer aus, da die höheren Temperaturen einen größeren Wasserverlust durch Verdunstung bedeuten. Aber nicht nur die Regenmenge, sondern die Dauer und Art des Niederschlags spielen eine wichtige Rolle: Ein sich über mehrere Tage erstreckender, an Luftmassenwechsel gebundener Landregen mit geringer Intensität begünstigt eine gute Aufnahme im Boden und eine tiefe Durchfeuchtung des Wurzelraums. Im Gegensatz dazu führt ein durch Gewitter oder Unwetter ausgelöster Starkregen mit sehr hoher Intensität vor allem zu Oberflächenabfluss, hochspriegenden Kanaldeckeln und Hochwasser in Bächen und Flüssen. Die stärksten Veränderungen der Starkregen seit 1990 betreffen

## AUTOR



■ Prof. Dr. Christoph Thomas ist Professor für Mikrometeorologie an der Universität Bayreuth. Für sein Projekt DarkMix wurde er vom Europäischen Forschungsrat mit einem ERC Consolidator Grant ausgezeichnet.

- 1 Vgl. J. Lüers, M. Soldner, J. Olesch, T. Foken: 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe. Homogenisierung der Bayreuther Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten. Arbeitsergebnisse Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Band 56. Bayreuth 2014. – Die verwendeten Wetterdaten stammen insbesondere vom Deutschen Wetterdienst, von ehrenamtlichen Wetterforschern sowie von der Messstation im Ökologisch Botanischen Garten der Universität Bayreuth.
- 2 KLIWA, Klimaveränderung und Wasserwirtschaft: Klimawandel Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Monitoringbericht 2016. Vgl. [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de).

vor allem die Monate Januar/Februar und September. Hier haben sowohl die absolute Regenmenge als auch die Häufigkeit dieser Ereignisse signifikant zugenommen. Die höheren Lufttemperaturen im Winter tragen zu einer Auffeuchtung der Luft bei, die meistens zu Regen- und nicht zu Schneefällen führt. Die Implikationen des deutlichen Klimawandels in Bayreuth sind vielfältig. So muss beispielsweise erheblich mehr in die Speicherung und Bevorratung von Wasser investiert werden, um den intensiven Herbstniederschlag in das Frühjahr hineinzuretten und sowohl für die Landwirtschaft als auch für die Trinkwasserversorgung nutzbar zu machen. Die Wassernetzwerke und die Wasserwirtschaft der gesamten Region sind an die steigenden Starkregemengen sowie an die geänderten Hoch- und Niedrigwasserpegel anzupassen.

und Gesundheit in Bayern“ gefördert. Am Beispiel der Modellstadt Bayreuth soll das Phänomen der „urbanen Wärmeinsel“ (engl. *Urban Heat Island*) untersucht und in Beziehung zur steigenden Ozonbelastung gesetzt werden. Ausgangspunkt des Vorhabens ist die in der Stadtklimatologie vieldiskutierte Erkenntnis, dass die Lufttemperatur in Städten oftmals erheblich höher ist als im unbebauten Umland. Die Forschungsarbeiten sollen zunächst zu einem besseren Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Klima und Lufthygiene führen. Auf dieser Grundlage werden dann künftig praxisnahe Handlungsempfehlungen für Städte und Gemeinden erarbeitet.

Gerade kleine und mittelgroße Städte bieten wegen ihrer überschaubaren Fläche das Potenzial, durch vorausschauende und prozessbasierte Stadtplanung die negativen Gesundheitsfolgen des Klimawandels abzuschwächen oder sogar zu verhindern. Mit Unterstützung der Stadt Bayreuth wird daher ein in Nordbayern einmalig dichtes Messnetzwerk von 12 Mikrowetterstationen eingerichtet. Die Stationen werden jeweils zur Hälfte einerseits in dicht bebauten und warmen, andererseits in begrünten und kühleren Stadtteilen installiert. Die Messungen werden in einer späteren Projektphase durch Computermodelle unterstützt, mit denen Luftströmungen innerhalb der Stadt und im Austausch mit dem Umland simuliert werden.

**„Die Klimaforschung beruht immer auf genauen Wetterbeobachtungen mit Messinstrumenten, deren hohe Qualität über einen langen Zeitraum gewährleistet sein muss.“**

### Gesundheitliche Folgen der Wärme- und Ozonbelastung

Vor kurzem ist an der Universität Bayreuth das interdisziplinäre Forschungsprojekt „Minderung Städtischer Klima- und Ozon-Risiken (MiSKOR)“ gestartet, das sich mit Folgen des Klimawandels für die menschliche Gesundheit befasst. Es wird vom Freistaat Bayern im Rahmen des Verbundprojekts „Klimawandel

■ Abb. 2: Das im neuen Forschungsprojekt MiSKOR geplante Messnetz in der Stadt Bayreuth (Karte: Google Maps (2018), Eintrag der Messorte: Christoph Thomas).



### Wetterbeobachtungen in Subsahara-Afrika

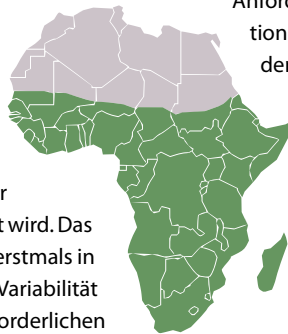
Mit ihrer langjährigen Expertise in der Wettermesstechnik und der internationalen Vernetzung ihrer Forschung ist die Bayreuther Mikrometeorologie auch auf dem afrikanischen Kontinent aktiv. Hier leistet sie einen zentralen Beitrag zur Qualitätssicherung der Sensorik, die für Wetterbeobachtungen eingesetzt wird. Damit ist gewährleistet, dass die Messergebnisse auf internationaler Ebene wissenschaftlich anerkannt werden. Die Forschungsarbeiten sind in das Projekt *Trans African Hydro-Meteorological Observatory* – kurz TAHMO – eingebettet. Es handelt sich um eine gemeinnützige Kooperation, in der sich die Oregon State University und die City University of New York (USA) sowie die Delft University of Technology (Niederlande) zusammengeschlossen haben und die Universität Bayreuth unterstützend beiträgt.

TAHMO hat sich zum Ziel gesetzt, ein dichtes Netzwerk von 20.000 automatischen Mikrowetterstationen in Afrika südlich der Sahara aufzubauen, um



flächendeckend den Ist-Zustand der Atmosphäre zu messen. Die so gewonnenen Messergebnisse sollen fundierte Aussagen zur Landwirtschaft, zur Wasserversorgung, zum Klimawandel und vielen weiteren Fragestellungen ermöglichen, die das Leben der lokalen Bevölkerung unmittelbar betreffen.

20.000 Stationen – dies bedeutet, dass im subsaharischen Raum, der zurzeit nur im Norden und Süden Afrikas durch nationale Wettermessnetze erfasst wird, alle 30 Kilometer eine neue Mess-Station errichtet wird. Das so entstehende Netzwerk wird erstmals in der Lage sein, die kleinräumige Variabilität von Niederschlag mit der erforderlichen Genauigkeit zu erfassen. TAHMO kombiniert in einzigartiger Weise eine innovative und zugleich kostengünstige Sensortechnologie, die fortwährende automatisierte Übertragung der Messdaten auf zentrale Datenserver und die direkte Einbeziehung der lokalen Bevölkerung vor allem in Schulen. Mitarbeiter vor Ort werden so geschult, dass sie Verantwortung für den Betrieb und die Wartung der Stationen übernehmen können. Schon Schülerinnen und Schüler lernen, wie die Messdaten erhoben und wissenschaftlich ausgewertet werden.



Die neuen Mikrowetterstationen messen eine Vielzahl von Parametern: Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck, Intensität der kurzweiligen Sonnenstrahlung, Niederschlag sowie die Anzahl und räumliche Entfernung von Blitzen. Sie wurden eigens für TAHMO in Kooperation mit einem in den USA und Deutschland ansässigen Unternehmen entwickelt. Die Wissen-

schaftler aus Bayreuth haben sie einem intensiven Feldversuch unterzogen, um eine unabhängige Beurteilung ihrer Qualität sicherzustellen. Dabei haben sie die mikrometeorologische Wetterstation im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth als Testbett genutzt, weil diese den hohen Anforderungen der World Meteorological Organization (WMO) lückenlos entspricht. Zusätzlich wurden hochqualitative Referenzgeräte eingesetzt.

Der Feldversuch ergab, dass nur bei wenigen Parametern – der Richtung schwacher Winde, der kurzweiligen Sonnenstrahlung und dem Starkniederschlag – noch Optimierungen erforderlich sind. Diese sind mittlerweile zum Teil schon umgesetzt worden.

Das insgesamt beeindruckende Testergebnis hat die Bayreuther Forscher bewogen, die für den subsaharischen Raum entwickelten Mikrowetterstationen auch für das MISKOR-Messnetzwerk in der Stadt Bayreuth zu verwenden. Die beiden Projekte zeigen damit beispielhaft, wie die Wetter- und Klimaforschung Menschen und Kontinente verbindet.

■ Abb. 3 und 4: Die TAHMO-Wetterstationen werden im Ökologisch-Botanischen Garten (ÖBG) der Universität Bayreuth getestet. Links: Überblick über den Messaufbau, rechts: Detailsicht (Fotos: Christoph Thomas).

■ Abb. 5: Afrika südlich der Sahara (Karte: *wiki-media commons / public domain / derivative work: Lew Palm*).

**LINKTIPPS**

Aktuelle Wetterdaten und Klimastatistiken der mikrometeorologischen Forschung an der Universität Bayreuth: [www.bayceer.uni-bayreuth.de/meteo](http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/meteo)

Homepage des Verbundprojekts „Klimawandel und Gesundheit in Bayern“: [www.vkg.bayern.de](http://www.vkg.bayern.de)



■ Abb. 6: Schüler der Mang'u High School in Thika, Kenia, installieren eine TAHMO-Mikrowetterstation. Dabei lernen sie, wie die Messtechnik funktioniert und die Messdaten interpretiert werden (Foto: METER group, USA/Deutschland).



■ Cyrus Samimi  
Isabell Haag

# Ökologische Kalender

Anpassungen an den Klimawandel auf dem Dach der Welt

■ Ackerbau ist in den Gebirgsdörfern im Pamir nur mit Bewässerung möglich, wie hier in Savnob (Foto: Isabell Haag).

**O**bwohl die Bevölkerungen in den Hochgebirgsregionen der Erde wenig zum globalen Klimawandel beitragen, spüren sie Temperaturerhöhungen und Veränderungen im Niederschlag sowie die damit verbundenen Folgen sehr stark. Für die Bewohner des in Zentralasien gelegenen Pamirs gilt dies in besonderem Maße. Der Großteil des Pamirs liegt in Tadschikistan, kleinere Anteile in Afghanistan, Kirgisistan und China. Die indigene Bevölkerung setzt sich aus Pamiri und Kirgisen zusammen, darüber hinaus leben heute vor allem Tadschiken und Chinesen im Pamir.

Mit Gipfelhöhen über 7.000 Metern zählt der Pamir zu den höchsten Gebirgsregionen der Erde. Große Gebiete liegen deutlich höher als 3.000 Meter. Ackerbau ist aufgrund der Trockenheit nur mit Bewässerung möglich und wird bis in Höhenlagen von etwa 3.000 Metern praktiziert. Weiden werden sogar bis in Höhen von rund 4.500 Metern genutzt. Schon diese sehr allgemeine Charakterisierung spiegelt die große Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Nutzung von den natürlichen Rahmenbedingungen wider. Entscheidend sind insbesondere die Temperaturverhältnisse: Sie bestimmen die Vegetationszeit und damit auch die Zeit für den Anbau von Getreide und Feldfrüchten. Für den Ackerbau ist wegen der natürlichen gletschergespeisten Flussabläufe in der Regel ausreichend Wasser verfügbar, so dass in dieser Hinsicht bisher kaum Einschränkungen zu beobachten sind. In Zukunft kann sich dies jedoch mit dem Abschmelzen der Gletscher ändern, insbesondere wenn die Flussabläufe durch kleinere Gletscher gespeist werden. Für die Weidewirtschaft ist neben den Temperaturen auch die winterliche Schneebedeckung auf den Sommerweiden von Bedeutung. Sie kann wegen der jahreszeitlichen Schwankungen der Schneefälle unterschiedlich lange dauern. Gerade im Frühjahr sind die Tiere oft geschwächt, da die Futtermittelversorgung im Winter eingeschränkt ist. Fällt spät im Frühling Schnee, verspätet sich der Weideauftrieb auf die Sommerweiden, was für geschwächte Tiere gravierende Auswirkungen hat.

### Ökologische Kalender: eine noch heute lebendige Tradition

Hauptsächlich im Westen und Süden des Pamirs sind seit rund 600 Jahren „Ökologische Kalender“ in lokalen Sprachen mündlich überliefert. Die Menschen haben natürliche Phänomene wie beispielsweise das Blühen bestimmter Pflanzen, die Ankunft von Zugvögeln oder die Ausbreitung der Schneebedeckung

zusammen mit dem Sonnenstand herangezogen, um die Jahreszeiten zu bestimmen und landwirtschaftliche Aktivitäten, aber auch kulturelle Festivitäten zu planen. Die Kalender gelten daher heute als Instrumente, die von der indigenen Bevölkerung zur Einschätzung der ökologischen Bedingungen genutzt wurden. Im Zuge der Gründung der Sowjetunion und durch den wachsenden Einfluss Chinas im Osten des Pamirs wurden diese traditionellen ökologischen Kalender verdrängt und unterdrückt. Moderne Methoden der industriellen Landnutzung hielten Einzug. Lediglich im afghanischen Pamir, der nur wenigen politischen und agrartechnischen Einflüssen von außen unterlag, wurden die Kalender bis heute ununterbrochen überliefert.

Im tadschikischen Pamir begannen die Menschen nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion, sich wieder ihrer traditionellen Kalender zu erinnern und sie teilweise wieder zu nutzen. Auch im kirgisischen Pamir, der schon immer in regen Austauschbeziehungen zum tadschikischen Pamir stand, sind der Bevölkerung ökologische Kalender ein Begriff. In China haben Geländebeobachtungen ebenfalls gezeigt, dass das traditionelle Wissen noch nicht verloren gegangen ist. Es ist also in gewissem Maß eine Wiederbelebung der Kalender festzustellen, zumindest sind die Erinnerungen daran noch nicht verloren gegangen. Allerdings haben sich in den letzten Jahrzehnten die klimatischen Bedingungen verändert, so dass die überlieferten Beobachtungen möglicherweise nicht mehr mit den gegenwärtigen Wetterphänomenen übereinstimmen.



■ Abb. 1: Neben Schafen und Ziegen sind Yaks die am häufigsten anzutreffenden Nutztiere in der Hochgebirgsregion des Pamirs (Foto: Isabell Haag).

■ Abb. 2: Auf den Sommerweiden im Pamir befinden sich die typischen Jurten, die während der Weidezeit als Wohnraum für die ganze Familie dienen (Foto: Isabell Haag).



■ **Abb. 3 (rechts):** Automatische Wetterstationen messen unter anderem Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bodenfeuchte in den Untersuchungsgebieten und geben somit Aufschluss über die lokalen klimatischen Bedingungen (Foto: Isabell Haag).

## LITERATURTIPPS

K.-A. S. Kassam, M. L. Ruelle, C. Samimi, A. Trabucco, J. Xu: Anticipating climatic variability: The potential of ecological calendars. *Human Ecology* (2018), 46 (2), 249-257. DOI: 10.1007/s10745-018-9970-5.

K. Emslie: Climate change is making calendars run amok. *National Geographic* (2016), June 7. [news.nationalgeographic.com/2016/06/towns-changing-clocks-time-climate-change-pamir-science/](http://news.nationalgeographic.com/2016/06/towns-changing-clocks-time-climate-change-pamir-science/)

## LINKTIPP

Homepage des transdisziplinären Projekts ECCAP (Ecological Calendars and Climate Adaptation in the Pamirs):

[www.klimatologie.uni-bayreuth.de/en/research/project-pamirs-2016/](http://www.klimatologie.uni-bayreuth.de/en/research/project-pamirs-2016/)

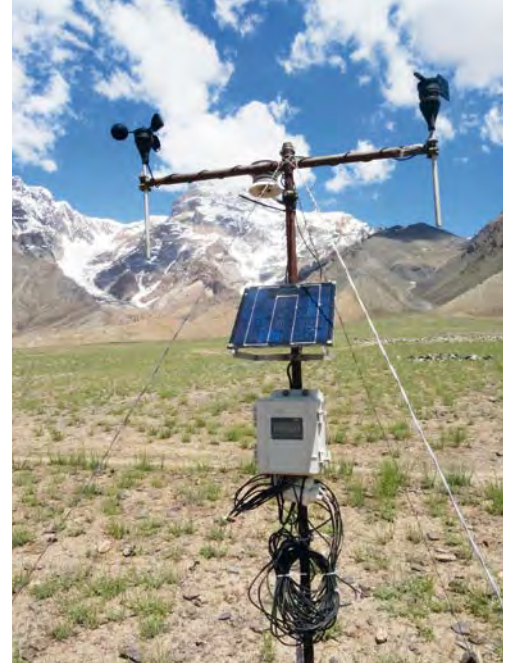
■ **Abb. 4:** Im Boden vergrabene Temperatur- und Feuchtesensoren messen die Bodenbedingungen im Stundentakt (Foto: Cyrus Samimi).

■ **Abb. 5:** Klimadaten zeigen, dass sich die Jahresmitteltemperatur in Zentralasien in den letzten 20 Jahren im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 deutlich erhöht hat.

## Ein transdisziplinäres Forschungsprojekt

Ein neues, vom Belmont-Forum und der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Forschungsvorhaben untersucht, ob ökologische Kalender als Instrumente für die Anpassung an den Klimawandel fungieren können. Die im Pamir überlieferten Kalender werden dabei verschriftlicht und wissenschaftlich dokumentiert. Die Arbeitsgruppe Klimatologie der Universität Bayreuth kooperiert in diesem transdisziplinären Projekt mit Forschungspartnern an der Cornell University (USA), dem Euro-Mediterranean Center on Climate Change (Italien) und dem Kunming Institute of Botany (China). Die Hauptarbeitsgebiete liegen in Kirgisistan, Tadschikistan und China. 2018 sollen ergänzende Untersuchungen in Afghanistan dazu kommen, weil dort ökologische Kalender seit Jahrhunderten ununterbrochen in Gebrauch sind.

In Kirgisistan und Tadschikistan werden die Untersuchungen hauptsächlich von den Teams aus Bayreuth, den USA und Italien geleitet. Im Vordergrund stehen Klimamessungen, phänologische Untersuchungen zum Zustand und Wachstum der Pflanzen sowie Interviews und Workshops mit der lokalen Bevölkerung. Um die klimatische Veränderung zu analysieren, haben Bayreuther Wissenschaftler Klimastationen auf-

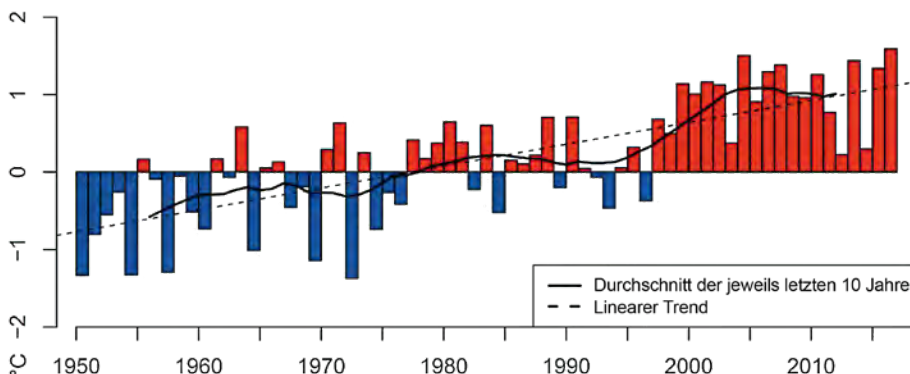


gestellt, die neben der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Wind auch die Bodentemperatur und Bodenfeuchte messen. Darüber hinaus führen sie in den Oasen mikroklimatische Messungen durch, außerhalb der Bewässerungsflächen werden in unterschiedlichen Höhen Daten zur Bodentemperatur und Bodenfeuchte erhoben. Ähnliche Untersuchungen finden unter Leitung der chinesischen Partner in China statt. In Tadschikistan umfasst der Untersuchungsraum die Gebirgssorte Savnob (2.700 Meter) und Roshorv (3.000 Meter), in Kirgisistan den Ort Sary-Mogol (3.000 Meter). Messgeräte wurden bis auf eine Höhe von 4.000 Metern installiert.

Die unterschiedlichen Höhenlagen zeigen sich in den möglichen Anbaufrüchten. Im tiefergelegenen Savnob können neben Weizen und Kartoffeln auch Gemüse und Obst, beispielsweise Aprikosen, angebaut werden. In Roshorv hingegen dominieren Gerste und Kartoffeln. Die Sommerweiden beider Orte liegen weit entfernt im Ostpamir. Um sie zu erreichen, müssen Menschen und Tiere noch immer lange Märsche zurücklegen. In Kirgisistan erstreckt sich das Untersuchungsgebiet vom Ort Sary Mogol bis zu den südlicher gelegenen Hochweiden des Ortes auf rund 3.600 Metern. Angebaut werden im Ort fast nur Gerste und Kartoffeln.

## Messergebnisse zum Klimawandel, lokale Anpassungsstrategien

Erste Ergebnisse von Bayreuther Seite bestätigen einen sehr starken Anstieg der Temperaturen im Pamir, insbesondere in den letzten 20 Jahren. Alle Jahreszeiten unterliegen diesem Erwärmungstrend, im Winter und im Frühjahr ist der Temperaturanstieg im Vergleich mit früheren Messungen jedoch besonders groß. In diesen beiden kühleren Jahreszeiten



haben sich auch die Niederschläge auffällig verändert: In den Wintermonaten sind sie leicht angestiegen, in den Frühjahrsmonaten hingegen gesunken. Diese Veränderungen in den klimatischen Rahmenbedingungen können weitreichende Folgen für die lokale Bevölkerung, deren Land und Vieh sowie für die regionale Biodiversität mit sich bringen. Insbesondere im Frühling und Sommer herrscht infolge steigender Temperaturen ein erhöhter Trockenstress, der zwar weniger fatal für die bewässerten Oasen ist, aber die natürlichen Ökosysteme und Sommerweiden stark belasten kann. Sollte sich der Erwärmungstrend auch in Zukunft mit der gleichen Intensität weiterentwickeln, werden auch die bewässerten Flächen betroffen sein, weil die Gletscher auf Dauer abschmelzen und das Wasser knapp wird. In den Wintermonaten kann die festgestellte Zunahme der Niederschlagsmengen dazu führen, dass Berg-

ten Jahren eine Veränderung in der Wahl der Anbaufrüchte statt. Wärmere Temperaturen ermöglichen es den Bewohnern in dem hochgelegenen Dorf Roshorv, nun auch Gemüse anzubauen. Selbst Obstbäume sind inzwischen keine Seltenheit mehr, auch wenn insbesondere Aprikosen nicht in jedem Jahr ausreifen. Die klimatisch bedingten Veränderungen beim Anbau der Feldpflanzen sollen nun mit Pflanzenwachstumsmodellen in Beziehung gesetzt und auf diese Weise wissenschaftlich nachvollzogen werden.

**„Geländebeobachtungen haben gezeigt, dass das traditionelle Wissen noch nicht verloren gegangen ist.“**

dörfer durch Lawinen für längere Zeit von größeren Versorgungszentren isoliert bleiben und auch das Vieh länger in den Ställen verweilen muss. Dieses Szenario konnte sehr deutlich im Winter 2016 beobachtet werden, als bis in das Frühjahr hinein die Untersuchungsgebiete in Tadschikistan durch Schneemassen abgeschnitten waren.

Die Messungen haben nicht nur gezeigt, dass sich die absoluten Temperatur- und Niederschlagsmuster im Pamir während der letzten Jahrzehnte verändert haben. Ebenso hat sich herausgestellt, dass die klimatischen Bedingungen von Jahr zu Jahr sehr verschieden sein können. So wurden insbesondere starke Schwankungen der Winterniederschläge festgestellt. Aber auch unerwartete Temperaturschwankungen sind gefährlich, weil sie vor allem im Frühjahr unerwartete Spätfröste auslösen können – mit verheerenden Folgen für die Land- und Viehwirtschaft. Diese statistischen Veränderungen im Klima konnten teilweise auch anhand von Befragungen und Interviews vor Ort nachgewiesen werden. Dabei hat sich bestätigt, dass sich die lokale Bevölkerung der klimatischen Veränderungen bewusst ist und mit Anpassungsstrategien darauf reagiert hat. Ein Beispiel ist der Bau robusterer Dächer, die größeren Schneemassen standhalten können. Des Weiteren fand in den letz-

**Wissenschaftliche Forschung und lokales Erfahrungswissen im Verbund**

Das Forschungsprojekt will unterschiedliche Faktoren erstmals miteinander in Verbindung bringen:

- einerseits das Wissen der indigenen Bevölkerung, deren Wahrnehmung klimatischer und ökologischer Veränderungen vor Ort sowie die daran angepassten Nutzungsstrategien,
- andererseits Messergebnisse zum Klimawandel und Modelle zum Pflanzenwachstum.

Auf dieser Grundlage sollen ökologische Kalender in einer aktualisierten Form, die den Klimaveränderungen Rechnung trägt, gemeinsam mit der Bevölkerung im Pamir entwickelt werden. Das reaktivierte Wissen soll an jüngere Generationen im Schulunterricht weitergegeben werden. Dann können die Kalender künftig bei der Planung landwirtschaftlicher Aktivitäten eingesetzt und auch in anderen Gebirgsregionen der Welt für die Anpassung an den Klimawandel genutzt werden.

**AUTOREN**



■ Prof. Dr. Cyrus Samimi ist Leiter der Abteilung Klimatologie an der Universität Bayreuth.



■ Isabell Haag M.Sc. ist Doktorandin und wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Abteilung Klimatologie.



■ Abb. 6: Workshop und gemeinsames Essen mit Bewohnern eines Dorfs in Tadschikistan (Foto: Isabell Haag).

■ Michael Hauhs  
Holger Lange

# Das Anthropozän

Realität oder akademische  
Konstruktion?

■ *Kunstwerk des Bildhauers Stephan Balkenhol in der Altstadt von Salzburg. Auf einer vergoldeten Kugel aus glasfaserverstärktem Kunststoff, die von einem schmiedeeisernen Gestell getragen wird, befindet sich eine männliche Figur aus Bronze (Foto: tichr / Shutterstock.com).*





Die Moderne begann in Europa und hat sich im 20. Jahrhundert als „große Beschleunigung“ zu einem globalen Prozess ausgeweitet, der nahezu alle Gesellschaften und alle Lebensbereiche beeinflusst.<sup>1</sup> Einflüsse der Moderne auf die Umwelt wurden lange Zeit als *Nebenwirkungen* eingeschätzt. Als Reaktion auf solche teilweise unerwarteten Umweltänderungen sind neue Spezialisierungen entstanden. Im Rahmen der universitären Ausbildung gehören dazu die zahlreichen Studiengänge zum Thema Umwelt oder Ökologie. Die an der Universität Bayreuth im Jahr 1978 gegründete Geoökologie ist ein frühes Beispiel. Ihr Ziel besteht in der Erforschung und Lösung von Umweltproblemen durch die Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden.

Der Begriff „Umweltproblem“ kann insofern irreführend wirken, als Naturwissenschaften auf die Existenz ihrer Gegenstände als unproblematisch verweisen: Diese Gegenstände existieren und wirken unabhängig davon, ob eine Wissenschaft danach fragt. Entsprechend gilt die Trennung von Fakten und Werten als Voraussetzung naturwissenschaftlicher Methodik. Eine Umwelt existiert aber nur *relativ* zu den Organismen, Populationen, Ökosystemen und Zivilisationen, für die diese Beziehung problematisch werden kann. Diese Akteure haben Eigenschaften und Ziele, beispielsweise das eigene Überleben oder ihre Lebensqualität, die außerhalb *naturwissenschaftlicher* Zuständigkeiten liegen. In der *Informatik* hingegen können Ziele als abstrakte Anforderungen an Programme formuliert werden, die sich in einer bestimmten Weise verhalten sollen. Ähnlich blickt die ökologische Modellbildung auf die „Beiträge der Natur“<sup>2</sup> zum Überleben oder zur Lebensqualität des modernen Menschen. Diese Beiträge können so abstrahiert werden, als handle es sich um Anforderungen an die Umwelt. Das gewünschte Verhalten, zum Beispiel die Nachhaltigkeit einer Ökosystemfunktion, rückt so ins Zentrum der Forschung.

Um zu einem naturwissenschaftlichen Gegenstand werden zu können, wird die Umwelt oft als System im Sinne der Physik beschrieben, zum Beispiel in der Analyse des Systems Erde. Dabei werden die Menschen abstrakt den Stoffkreisläufen gegenübergestellt, auf die sie Einfluss nehmen und von denen sie gleichzeitig abhängen.<sup>3</sup> In der Geschichte der Umweltforschung hat sich die Skala der Probleme erweitert: von lokalen Untersuchungen zur Gewässerverschmutzung über regionale Fallstudien zur Bodenversauerung und Luftverunreinigung bis hin zum heutigen globalen Klimaproblem.

Auf dieser globalen Skala hat sich nicht nur das Ausmaß, sondern auch der Charakter der Fragestellungen geändert. Wirkungen, etwa bei der Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus fossilen Vorräten, lassen sich nur noch schwer oder gar nicht nach ihrer Entfernung von der Quelle unterscheiden. Methoden, die das voraussetzen, sind überfordert. Forscher, die sich mit den Beziehungen von Leben und dessen Umwelt befassen, finden sich in Gemeinschaft oder in Auseinandersetzung mit anderen gesellschaftlichen Akteuren, die damit keine wissenschaftlichen, sondern politische, ökonomische oder soziale Projekte verfolgen. Im Unterschied zu anderen naturwissenschaftlichen Begriffen wie „physikalisch“ oder „chemisch“ wird das Adjektiv „ökologisch“ normativ als ein Fahnenwort gebraucht: als ein Begriff, mit dem sich Akteure in politischen oder sozialen Kontexten identifizieren.<sup>4</sup> Die Trennung von Werten und Fakten ist daher in der Umweltforschung durch den Gegenstand selbst erschwert. Klima oder Boden sind nicht mehr nur Gegenstand von Forschung, sondern auch Gegenstand von Politik. Die Bezüge zwischen den Themen der Forschung und den Begriffen der Debatte sind *logisch* zirkulär geworden.

Zur Bearbeitung von solchen zirkulären Bezügen im Verhalten werden angemessene Begriffe für ihre Erforschung und Modellierung benötigt. In der Ökosystemforschung werden daher auch Grundlagenfragen untersucht, ohne dass diese dabei der Grundlagenforschung in etablierten Disziplinen zugeordnet werden.<sup>5</sup> Aus diesem Anlass sucht die Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth nach interdisziplinären Konzepten und Methoden zur Behandlung von Mensch-Umwelt-Beziehungen. Die Suche bei den Methoden richtet sich an die Informatik, bei den Inhalten auch an die Kulturwissenschaften.

### Der Begriff des Anthropozäns: ein Manifest von interdisziplinärer Forschung

Der Begriff des Anthropozäns wurde vom Atmosphärenforscher Paul J. Crutzen als „Geologie der Menschheit“ eingeführt.<sup>6</sup> Damit sollte der Einfluss der modernen Zivilisation auf globale Stoffkreisläufe als ein neues geologisches Zeitalter markiert werden. Der Fokus der Darstellung verlagert sich dabei vom Raum auf die Geschichte als primäres Merkmal von Umweltproblemen. In physikalischen Modellen des Erdsystems ist die Zeit ein äußerer Parameter wie bei einem Naturgesetz. Crutzen hingegen teilt die Erdgeschichte erstmals nach der Wirkung menschlicher Entscheidungen ein. Die vom Menschen

## AUTOREN



■ Prof. Dr. Michael Hauhs ist Inhaber des Lehrstuhls für Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Holger Lange ist Professor für Ökologische Modellbildung an der Universität Bayreuth und Abteilungsleiter für Terrestrische Ökologie am Norwegischen Institut für Bioökonomie (NIBIO).

## LITERATURTIPPS

M. Hauhs, A. Kastner-Maresch, H. Lange: Die Modellierung ökologischer Systeme – wissenschaftliche Computerspiele oder theoretische Alchemie? *Petermanns Geographische Mitteilungen* (2000), 144, 2.

M. Hauhs, B. Trancón y Widemann, G. Klute: Bridging disciplinary gaps in studies on human-environmental relations: a modelling framework. *Modern Africa: Politics, History and Society* (2017), 5 (22), 35-76. DOI: 10.26806/modafr.v5i2.196.

## „Der Begriff des Anthropozäns fordert auf zu einer neuen Zusammenarbeit zwischen Natur-, Technik-, Sozial- und Kulturwissenschaften.“

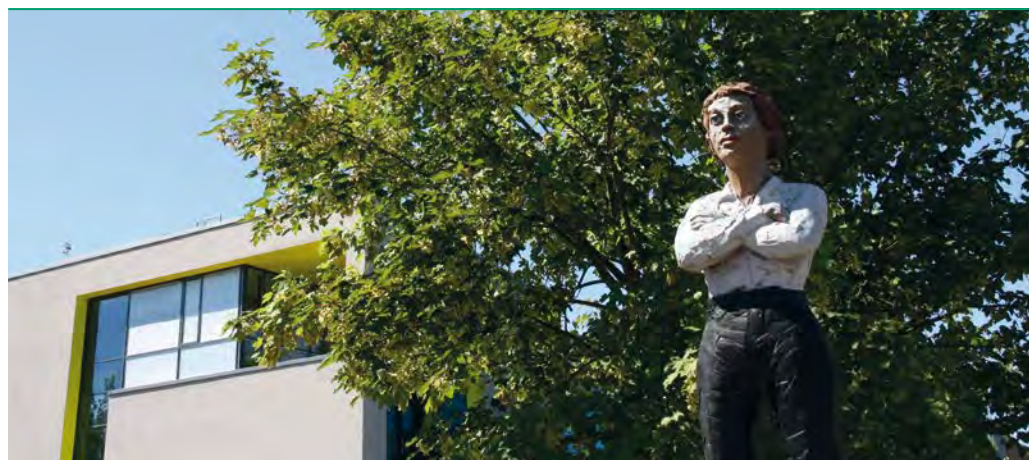
entwickelten Techniken der Ressourcennutzungen führen nicht nur zu Nebenwirkungen in der Umwelt, sondern auch zu einer Neubewertung natürlicher Prozesse. Zielgerichtetes Verhalten und weitere Eigenschaften des Menschen, von denen in den Naturwissenschaften abstrahiert wird, werden nun zur Gliederung von geologischen Epochen genutzt. Damit fordert der Begriff des Anthropozäns auf zu einer neuen Zusammenarbeit zwischen Natur-, Technik-, Sozial- und Kulturwissenschaften.

Die Erforschung der globalen Umweltwirkungen verlangt offensichtlich nach interdisziplinärer Kooperation. Wissenschaftliche Arbeitsteilung kann nur funktionieren, wenn sich die gemeinsam zu bearbeitenden Aufgaben in Alltagsbegriffen wiederfinden, bevor sie an Spezialisten delegiert werden. Die jeweils „zuständigen“ Experten sollten sich daher gegenseitig und gegenüber ihrem Publikum verständlich machen können. Auf fachwissenschaftlichen Tagungen, die das „Anthropozän“ thematisieren, werden daher regelmäßig beide Wissenschaftsseiten, die der Natur und der Kultur, eingeladen. Die naturwissenschaftliche Seite ist durch den Bezug auf „die Realität“, die kulturwissenschaftliche durch den Umgang mit Interpretationen charakterisiert. Aus der ersten Sicht verlangt das Anthropozän einen Nachweis durch Fakten, aus der anderen eine Reflexion über die Konstruktion der Begriffe. Eine Verständigung zwischen diesen Traditionen kann allerdings misslingen. Dies zeigte sich während einer Debatte,

die im Haus der Kulturen in Berlin mit dem Soziologen Bruno Latour und dem Klimaforscher Hans Joachim Schellnhuber zwei prominente Vertreter der Kultur- und Naturwissenschaften zusammenbrachte.<sup>7</sup> Die von den Teilnehmern verwendeten Begriffe wurden jeweils nicht von ihrem Gegenüber übernommen oder nachvollziehbar übersetzt.

Dieses Beispiel macht deutlich: Die Konzepte und Modelle, die seitens verschiedener Disziplinen in den Debatten um globale Umweltprobleme verwendet werden, könnten sich als inkompatibel erweisen. Für die Kulturwissenschaften drängen sich neue Interpretationen auf; Bruno Latour sieht im Begriff des Anthropozäns die Ablösung von der „Moderne“ als Leitbegriff der Gegenwart.<sup>8</sup> Die unterschiedlichen Interpretationen des Begriffs „Anthropozän“ erschweren die Organisation von Interdisziplinarität. Zu stark scheinen die Standpunkte von den jeweiligen Modellvorstellungen geprägt zu sein. Die Reflexion über die Möglichkeiten und Grenzen ausgewählter Modellkonzepte kann aber ein Weg sein, um zwischen diesen Konzepten zu vermitteln.<sup>9</sup>

Klimawandel und globale Umweltänderungen, bis vor wenigen Jahrzehnten nur ein Nebenschauplatz der Moderne, sind zum zentralen Phänomen geworden, an dem sich Kritik und neue Begrifflichkeiten entzünden können. Die Zerlegung der Welt in ihre Bausteine, die auf vielen Gebieten der naturwissenschaftlichen Forschung funktioniert, erweist sich auf dieser globalen Skala als überfordert. Die Arbeitsteilungen der modernen Gesellschaft, einschließlich der Wissenschaften, stehen selbst auf dem Prüfstand. Wenn globale und lokale Wirkungen nicht mehr unterscheidbar sind, wenn Fakten und Werte nicht trennbar sind, wenn die Unterscheidung in Natur und Kultur misslingt, dann verlieren tradierte wis-



senschaftliche Modelle und Begriffe – beispielsweise der Rückgriff auf mechanische Kräfte – ihre Überzeugungskraft.<sup>10</sup> Andere Begriffsbildungen werden benötigt, die es besser vermögen, diese Phänomene in die Alltagssprache zu holen. Ein möglicher Lieferant dafür ist die Informatik: Ein Betriebssystem ist in der Informatik beides, real und konstruiert. Die aktuelle Debatte über das Anthropozän ist daher auch ein Versuch, die Herausbildung neuer vermittelnder Metaphern und Begriffe voranzutreiben.

## Rollen- und Perspektivwechsel als Ansatzpunkte für künftiges Forschen

Wie könnte die Integration von Wissenschaft und Praxis im Anthropozän organisiert sein? Wie kann, wie soll eine Universität den Nachwuchs auf das Anthropozän vorbereiten? Wir besitzen derzeit keine Sprache, die zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Kompetenzen und Sichtweisen präzise genug vermitteln kann. Das fällt an einer auf Interdisziplinarität fokussierten Forschungs- und Bildungseinrichtung wie der Universität Bayreuth besonders auf. Das Nebeneinander der Fakultäten ist oft nur sehr schwer zu überbrücken. In der Moderne stellte dies kein wirkliches Problem dar, solange alle Zeitgenossen darauf vertrauen konnten, nur eine einzige Realität zu teilen. Doch wie kann die angestrebte Integration gelingen, wenn es weder ein ungebrochenes Vertrauen in die *eine* Realität noch ein durch gemeinsame Begriffe vermitteltes Nebeneinander gibt?

Einen Ausweg könnte das folgende Gedankenexperiment erschließen: Man stelle sich vor, die in den Fakultäten einer Universität angebotenen Rollen – mit ihren jeweiligen Sichtweisen und Kompetenzen – würden von ihren Mitgliedern nicht als ein Neben-, sondern als ein Nacheinander erfahren. Ein organisiertes Nacheinander typischer Rollen, zum Beispiel des kultur- und naturwissenschaftlichen Forschens, wäre als virtueller Wechsel von Fakultäten technisch möglich. In derartigen *anthropocene studies* sind Inhalte der Natur- und der Kulturwissenschaften verpflichtend. Die unterschiedlichen Ontologien werden abwechselnd in ihren Möglichkeiten erfahren und in ihren Begrenzungen reflektiert. Daraus könnte sich eine angemessene Form der akademischen Vorbereitung auf die Bedingungen des Anthropozäns entwickeln – als desjenigen Zeitalters, in dem die Frage „real oder konstruiert?“ obsolet geworden ist. Der alte Gegensatz zwischen „real“ und „konstruiert“, an den auch die Überschrift dieses Beitrags anknüpft, wird jetzt durch das weit schwierigere Pro-

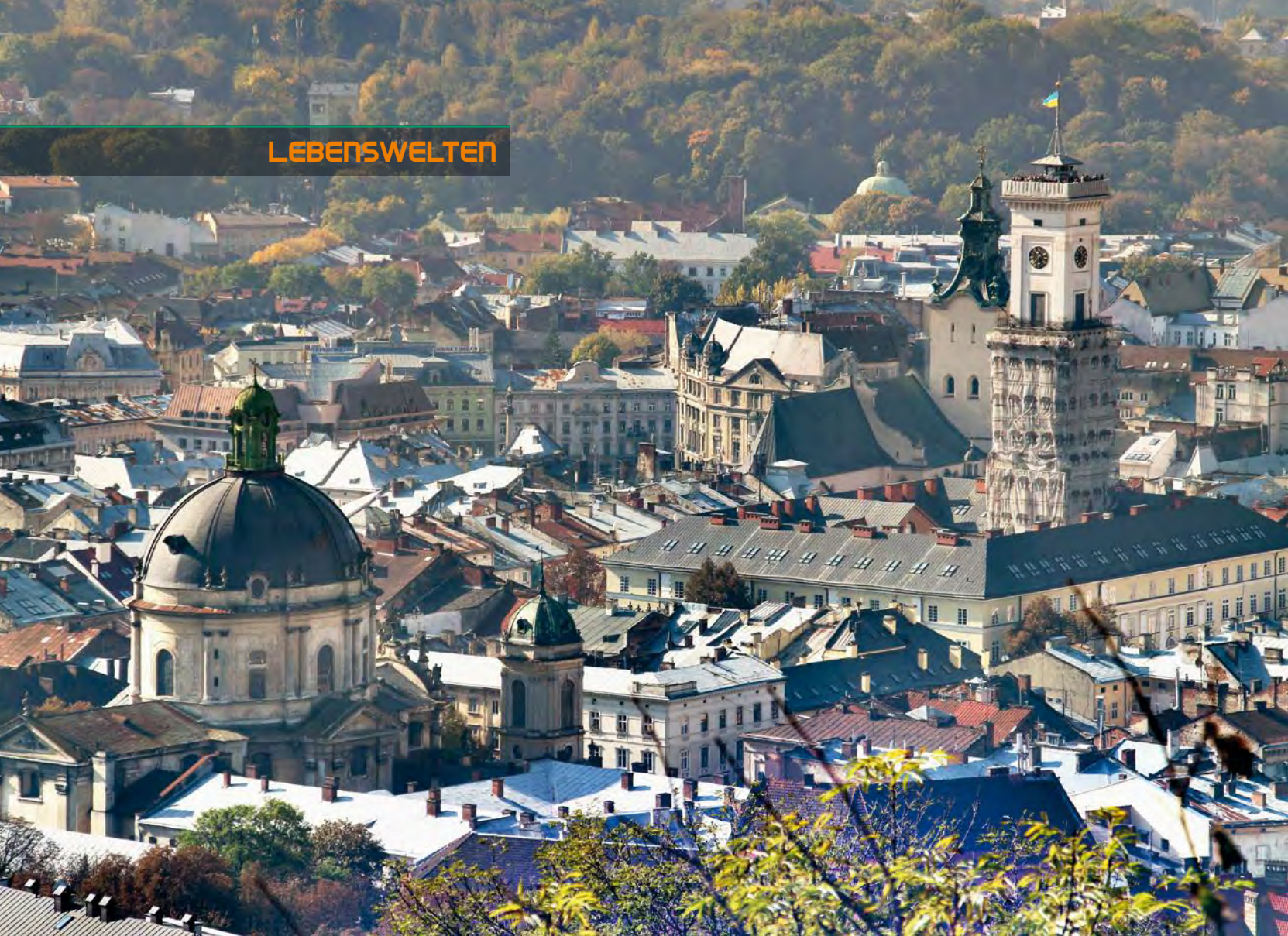


blem ersetzt, wie man mit beiden Begriffen zu einer konsistenten Deutung von Daten der Welt gelangen kann. Forschende und Lehrende sollten daher mit beiden Aspekten dieser Frage umgehen können.

Die vermittelnde Rolle von Modellen hat Robert Rosen (1985) als einer der ersten betont.<sup>11</sup> Das folgende Zitat kann auch als Motto des nicht länger modernen Zeitalters des Anthropozäns aufgefasst werden: „For in a profound sense, the study of models is the study of man; and if we can agree about our models, we can agree about everything else.“

■ Statuen von Stephan Balkenhol auf dem Campus der Universität Bayreuth: vor der Universitätsbibliothek (Abb. 1, außen links), vor den Polymerwissenschaften (Abb. 2, links) und vor den Rechts- und Wirtschaftswissenschaften (Abb. 3, oben) (Fotos: Christian Wißler).

- 1 W. Steffen, W. Broadgate, L. Deutsch et al.: The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* (2015), 2 (1), 81-98. DOI: 10.1177/2053019614564785.
- 2 „Nature's contributions to people“ ist ein Begriff zur Beschreibung von Mensch-Umwelt-Beziehungen, siehe: S. Diaz, U. Pascual, M. Stenseke et al.: Assessing nature's contributions to people. *Science* (2018), 359 (6373), 270-272. DOI: 10.1126/science.aap8826.
- 3 H. J. Schellnhuber: 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* (1999), 402, Supp., C19-C23.
- 4 Vgl. L. Trepl: *Geschichte der Ökologie*. Frankfurt am Main 1987.
- 5 M. Hauhs, A. Kastner-Maresch, H. Lange (2000): siehe Literaturtipps.
- 6 P. J. Crutzen: *Geology of Mankind*. *Nature* (2002), 415, 23.
- 7 Die Veranstaltung war Teil des Anthropozän-Projekts im Haus der Kulturen der Welt, siehe: [www.hkw.de/de/programm/projekte/2014/anthropozan/anthropozan\\_2013\\_2014.php](http://www.hkw.de/de/programm/projekte/2014/anthropozan/anthropozan_2013_2014.php)
- 8 „Anthropocene could offer another occasion to find an alternative to modernization“, in: B. Latour (2014): „Anthropology at the Time of the Anthropocene – a personal view of what is to be studied.“ Vortrag bei der American Association of Anthropologists, [www.bruno-latour.fr/sites/default/files/139-AAA-Washington.pdf](http://www.bruno-latour.fr/sites/default/files/139-AAA-Washington.pdf).
- 9 Vgl. M. Hauhs, B. Trancón y Widemann, G. Klute (2017): siehe Literaturtipps.
- 10 Vgl. B. Latour: *Das terrestrische Manifest*. Frankfurt am Main 2018.
- 11 R. Rosen: *Anticipatory systems: Philosophical, mathematical and methodological foundations*. Oxford 1985, 404.



■ Nicolai Teufel  
Martin Doevenspeck

# Grenzräume in Bewegung

Neue Impulse für Mittel- und Osteuropa durch Forschung und Studium

■ Blick vom Hohen Schloss (Wysokyj Zamok) auf das Rathaus und das historische Zentrum von Lwiw, das 1998 in die Liste des UNESCO-Welterbes aufgenommen wurde (Foto: Nicolai Teufel).

Von Lemberg zu Lwów, von Lwow zu Lwiw. Die Stadt Lwiw im Westen der Ukraine hat in den letzten einhundert Jahren vier unterschiedliche Namen getragen und gehörte zu sechs verschiedenen Staaten: Von 1772 bis 1918 zum Habsburger Reich, für fünf Monate nach Kriegsende zur Westukrainischen Volksrepublik, von 1919 bis 1939 zu Polen, im Zweiten Weltkrieg zunächst zur Sowjetunion, später zum Deutschen Reich, von 1944 bis 1991 zur Sowjetunion und seit 1991 zur Ukraine, die in jenem Jahr ihre Unabhängigkeit erlangte. Die Bauten und ihre überlieferten Inschriften in Deutsch, Polnisch, Ukrainisch, Russisch, manchmal auch in Armenisch und Jiddisch zeugen vom polyethnischen Erbe Galiziens, dem fortwährenden Wandel von Grenzen im östlichen Europa, aber auch vom einstigen Reichtum der Stadt. In seiner 2017 veröffentlichten Studie „Lemberg. Die vergessene Mitte Europas“ hat der Journalist und Historiker Lutz J. Kleveman die Geschichte des heutigen Lwiw nacherzählt.<sup>1</sup> „Lemberg ist ein Brennglas europäischer Geschichte, hier verdichtet sich das Drama des 20. Jahrhunderts wie nirgendwo sonst. Seit dem Habsburger Reich und bis in die 1930er Jahre war Lemberg eine große kulturelle Metropole, in der Polen, Juden, Deutsche und Ukrainer friedlich koexistierten. Dann aber verlor die Stadt (...) durch den Zweiten Weltkrieg, sowjetische Deportationen, den Holocaust und die Vertreibung der Polen fast alle ihre Einwohner – und damit ihre kulturelle Persönlichkeit und ihr Gedächtnis.“<sup>2</sup>

Heute ist die Stadt Lwiw – und mit ihr der ostmitteleuropäische Raum insgesamt – für weite Teile der deutschsprachigen geographischen Forschung eine „terra incognita“. Das Geographische Institut der Universität Bayreuth hat daher Forschungsprojekte auf den Weg gebracht, die Studierende und Lehrende aus verschiedenen Ländern Mittel- und Osteuropas in Kontakt bringen.

### Vernetzte Forschung und wechselseitiges Lernen vor Ort

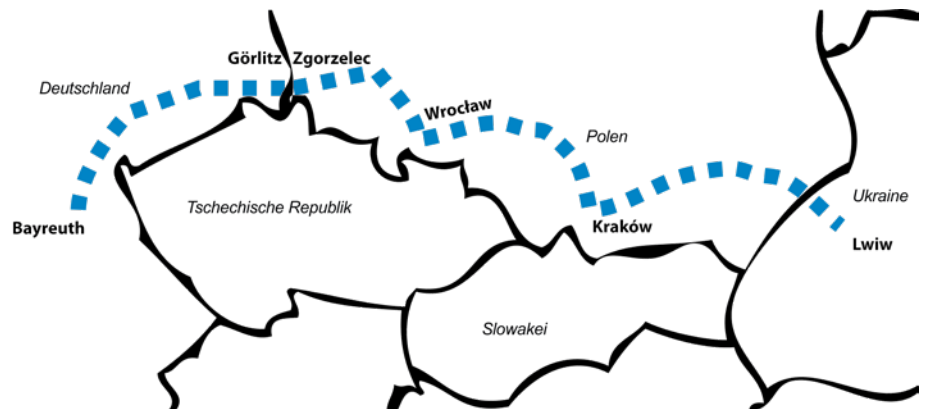
Seit 2017 sind die Nationale Iwan-Franko-Universität Lwiw und die Universität Bayreuth durch ein *Memorandum of Understanding* verbunden, das aus einer langjährigen Partnerschaft hervorgegangen ist. Zuvor hatten Studierende und Forschende beider Universitäten in bilateralen Projekten zusammengearbeitet. Dabei wurden historische Grenzverschiebungen, wirtschaftliche und soziale Transformationsprozesse sowie geopolitische Fragestellungen aus der Perspektive mittel- und osteuropäischer Staaten

analysiert. 2015 startete ein *Moving Seminar* in fünf Städten entlang der mittelalterlichen Handelsstraße Via regia. Die mehr als 20 Teilnehmerinnen und Teilnehmer setzten sich zunächst in Bayreuth mit grundlegenden Konzepten wie „Territorialität“, „Grenze“, „Kultur“ und „Raum“ auseinander. In Görlitz/Zgorzelec, Wrocław, Kraków und Lwiw besuchten sie an-

schließend Orte, die historische Symbolkraft besitzen oder für die heutigen wirtschaftlichen, kulturellen und politischen Kontakte zwischen Polen, Deutschland und der Ukraine von besonderer Bedeutung sind. Gemeinsam mit Akteuren aus der Politik und Zivilgesellschaft wurden Möglichkeiten einer engeren Zusammenarbeit erörtert. Das Auswärtige Amt förderte das *Moving Seminar* aus dem Programm „Ausbau der Zusammenarbeit mit der Zivilgesellschaft in den Ländern der Östlichen Partnerschaft“. 2009 hatte die Europäische Union das Programm „Östliche Partnerschaft“ eingerichtet, das Teil ihrer „Europäischen Nachbarschaftspolitik (ENP)“ ist. Mit dem Ziel, die Voraussetzungen für eine verstärkte wirtschaftliche Integration und eine künftige politische Assoziierung zu fördern, wurden Kooperationsvereinbarungen mit Armenien, Aserbaidschan, Belarus, Georgien, Moldawien und der Ukraine abgeschlossen.

„Wer heute durch Ostmitteleuropa reist, erlebt einen äußerst heterogenen, spannenden und gleichzeitig nur wenig erforschten Raum.“

■ Abb. 1: Route der 14-tägigen Studienreise während des deutsch-ukrainisch-polnischen *Moving Seminars* zum Thema „Grenzen und Begegnungen zwischen Menschen, Gütern, Kulturen und Wissen entlang der Via regia“ im September 2015 (Grafik: Nicolai Teufel).



Die historische Region Galizien zwischen Kraków im Südosten Polens und Lwiw stand 2017 im Zentrum einer deutsch-ukrainischen Exkursion, die vom Bayerischen Hochschulzentrum für Mittel-, Ost- und Südosteuropa (BayHOST) gefördert wurde. Rund 30 Studierende aus Lwiw und Bayreuth haben sich dabei erneut mit Perspektiven der Zusammenarbeit

1 L. J. Kleveman: Lemberg. Die vergessene Mitte Europas. Berlin 2017.  
 2 „Ein Brennglas europäischer Geschichte“, Interview von P. P. Engel mit Lutz C. Kleveman. Jüdische Allgemeine (online), 27. Juni 2017. [www.juedische-allgemeine.de/article/view/id/28912](http://www.juedische-allgemeine.de/article/view/id/28912).



■ Abb. 2 und 3: Studierende aus Bayreuth und Kyjiw besichtigen den Unabhängigkeitsplatz (Majdan Nesaleschnosti) in Kyjiw, der in Deutschland vor allem als zentraler Schauplatz der Orangen Revolution 2004 und der Majdan Revolution 2013/2014 bekannt ist. Heute erinnern Schautafeln und Stelen an diese Ereignisse und deren Opfer (kleines Bild) (Fotos: Nicolai Teufel).



## AUTOREN



■ Nicolai Teufel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kulturgeographie an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Martin Doevenspeck ist Professor für Politische Geographie an der Universität Bayreuth.

über die EU-Außengrenze hinweg befasst. Dabei haben sie auch jahrhundertealte historisch-politische Entwicklungen, die bis ins 10. Jahrhundert zurückreichen, in Betracht gezogen. Am Beispiel Galiziens wurde die grundsätzliche Frage erörtert, wie sich Regionen als wirtschaftliche und kulturelle Konstruktionen herausbilden und wie ihre Abgrenzungen immer wieder gesellschaftlich neu verhandelt werden.

Die historische Via regia führte einst von Santiago de Compostela im Nordwesten Spaniens bis nach Kyjiw, der heutigen Hauptstadt der Ukraine. Seit 1991 durchläuft das Land einen Transformationsprozess, der durch Korruption, die Annexion der Krim, den gewaltsamen Konflikt in der Ost-Ukraine und die damit verbundene wirtschaftliche Destabilisierung erschwert wird. Vor diesem Hintergrund haben sich Studierende der Universität Bayreuth sowie der Nationalen Hochschule Kyjiw-Mohyla-Akademie, der Taras-Schewtschenko-Universität Kyjiw und der Universität für Architektur und Konstruktion Kyjiw im Mai/Juni 2018 in Bayreuth und Kyjiw getroffen und sich mit Aspekten einer postsozialistischen Stadtentwicklung auseinandergesetzt. Nach einem gemeinsamen Theorie-Seminar in Bayreuth haben sie in Teamarbeit in der ukrainischen Hauptstadt Entwicklungskonzepte für ausgewählte Stadtteile entworfen. Dortige aktuelle Herausforderungen umfassen Prozesse der Gentrifizierung und Suburbanisierung ebenso wie die Revitalisierung großer Industriebrachen.



Wer heute durch Ostmitteleuropa reist, erlebt einen äußerst heterogenen, spannenden und gleichzeitig nur wenig erforschten Raum, der von Oberfranken aus gesehen „direkt vor der Haustür“ liegt. Die Universität Bayreuth wird deshalb ihre Kooperationen, die sie mit ihren Partnern im Rahmen des *Moving Seminar*-Projekts auf den Weg gebracht hat, weiter vertiefen. Sie will ihre Studierenden ausdrücklich ermutigen, sich für diese Zusammenarbeit zu engagieren. Studierende im Masterstudiengang „Human-geographie“ erhalten in einem Modul „Angewandte Raumentwicklung in Mittel- und Osteuropa“ die Möglichkeit, sich mit den vielfältigen Facetten der europäischen Regional- und Nachbarschaftspolitik vertraut zu machen und sowohl die wissenschaftliche Arbeit als auch die berufliche Praxis in diesem Bereich kennenzulernen. Mit Bachelor- und Masterarbeiten, die in Zusammenarbeit mit der Nationalen Iwan-Franko-Universität Lwiw oder der Westböhmisches Universität Pilsen entstehen, füllen Bayreuther Studierende den wissenschaftlichen Austausch mit Leben.

### Grenzüberschreitende Zusammenarbeit

Seit der Osterweiterung der Europäischen Union im Jahr 2004 und dem Beitritt zum Schengener Abkommen im Jahr 2007 haben insbesondere Polen, aber auch die Tschechische Republik, die Slowakei und Ungarn einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung erfahren. Trotz gegenteiliger politischer Stimmen wird die EU-Mitgliedschaft von der Mehrheit der Bevölkerung dieser Länder, die sich in der Visegrád-Gruppe zusammengeschlossen haben, positiv bewertet. Sie bedeutet nach Jahrzehnten hinter dem Eisernen Vorhang auch eine „Rückkehr zum Westen“.

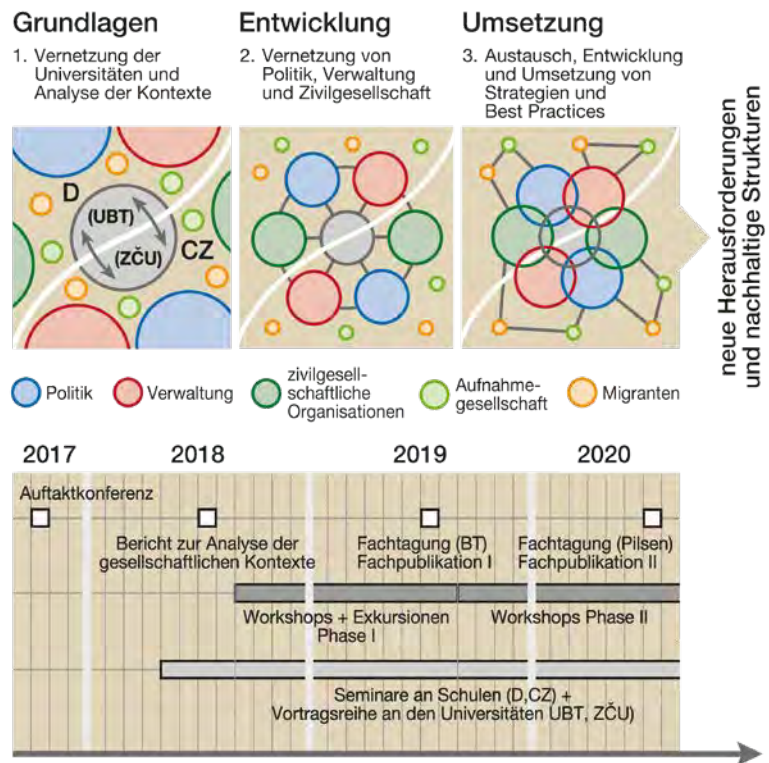
■ Abb. 4: Städte wie Cheb (Eger) in der Tschechischen Republik haben infolge der grenznahen Zusammenarbeit, wie sie die Euregio Egrensis fördert, einen Aufschwung erlebt (Foto: Martyn Jandula / Shutterstock.com).

Die Euroregionen, die an den östlichen Grenzen Deutschlands seit 1991 nach dem Vorbild der Kooperation mit Frankreich und den Benelux-Staaten eingerichtet wurden, sind heute ein bewährtes Instrument der Zusammenarbeit. Dazu zählt auch die Euregio Egrensis, die Teile von Bayern, Böhmen, Sachsen und Thüringen umfasst. Eine Forschungsgruppe des Geographischen Instituts der Universität Bayreuth hat sie kürzlich evaluiert. In Zusammenarbeit mit der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, einem bundesweiten Netzwerk, hat sie neue Entwicklungsperspektiven ausgelotet – zum Beispiel eine bayerisch-tschechische Gesundheits- und Heilbäderregion. Die Potenziale für grenzüberschreitende Initiativen wurden übereinstimmend als hoch eingeschätzt.

Von den meisten Menschen in Ostmitteleuropa wird Deutschland heute als Hochtechnologieland und attraktiver Wissenschaftsstandort sowie als wichtiger wirtschaftlicher, politischer und kultureller Akteur in ihren eigenen Ländern wahrgenommen. Zahlreiche Mittlerorganisationen wie die deutschen Außenhandelskammern, die Goethe-Institute, der DAAD, aber auch politische Stiftungen und wissenschaftliche Auslandseinrichtungen wie das Deutsche Historische Institut in Warschau sind angesehene Partner. Aus dieser Vernetzung ergeben sich auch für die geographische Forschung neue Herausforderungen. In Bayreuth befasst sich daher ein Forschungsprojekt von Nicolai Teufel mit der Dynamik räumlicher Strukturen und Abgrenzungen, die sich im ostmitteleuropäischen Raum geradezu exemplarisch beobachten lässt. Sie verlangt – nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Globalisierung – nach neuen theoretischen Zugängen, die vor allem die sozialen und ökonomischen Prozesse in den Blick nehmen, die an der Konstruktion räumlicher Strukturen beteiligt sind.

### Migration und Flucht: Neue Herausforderungen für Europa

Der Umgang mit Migrations- und Fluchtbewegungen nach Europa wird für die Zukunft der Europäischen Union mitentscheidend sein. Obgleich immer wieder „europäische Lösungen“ gefordert werden, beschränken sich politische Maßnahmen, aber auch wissenschaftliche Analysen zumeist auf eine nationale Perspektive. Diesen verengten Blickwinkel zu überwinden, war das Ziel eines vom DAAD geförderten Seminars über „Migration und Integration“, das 2016 zunächst in Lwiw und anschließend in Bayreuth stattfand. Studierende und Lehrende aus beiden Univer-



sitätsstädten tauschten sich aus über die Integration von Migranten und Geflüchteten in den Arbeitsmarkt, ihre Versorgung mit Wohnraum und über Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz. Dabei wurden einerseits die ukrainische Binnenmigration aus den Kriegsgebieten im Donbass und der Krim, andererseits die seit 2015 anhaltende Zuwanderung in die EU thematisiert.

„Migration und Integration in der bayerisch-tschechischen Grenzregion“ ist der Titel eines EU-Projekts, das die Universität Bayreuth und die Westböhmisches Universität Pilsen gemeinsam auf den Weg gebracht haben. Es bleibt nicht bei wissenschaftlichen Analysen stehen, sondern bezieht auch praktische Fragestellungen ein. Gemeinsam arbeiten die Projektpartner darauf hin, Akteure aus Wissenschaft, Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Zivilgesellschaft auf beiden Seiten der bayerisch-tschechischen Grenze zu vernetzen. Auf diese Weise verhart die grenzüberschreitende Forschung nicht in einer distanzierten Betrachterrolle, sondern führt unterschiedliche Kompetenzen und Erfahrungshorizonte so zusammen, dass davon neue Impulse für die europäische Zusammenarbeit ausgehen.

■ Abb. 5: „Migration und Integration in der bayerisch-tschechischen Grenzregion“, ein gemeinsames Projekt der Universität Bayreuth (UBT) und der Westböhmisches Universität Pilsen (ZČU), wird von der EU im Rahmen von INTERREG, einer Initiative des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), gefördert (Grafik: Michael Wegener).

### LITERATURTIPPS

N. Teufel: Grenzforschung im Nexus Vergangenheit-Gegenwart-Zukunft, in: J.-E. Steinkrüger, W. Schenk (eds.): Zwischen Geschichte und Geographie, zwischen Raum und Zeit. Münster 2015, 13-23.

B. Bruns, M. Doevenspeck (2015): Territorien und Grenzen in Bewegung: östliche Partnerschaft und EU-Außengrenze. Geographische Rundschau (2015), 67 (11), 4-9.



■ Abb. 6: Projektteilnehmer im Spiegelsaal der Nationalen Iwan-Franko-Universität Lwiw während des deutsch-ukrainischen Moving Seminar über „Flucht und Migration als zivilgesellschaftliche Herausforderung“ im November 2016 (Foto: Nicolai Teufel).

# Migration als Lebensform

Mobilität zwischen Stadt  
und Land in Subsahara-Afrika



■ Der zentrale Busbahnhof in Kumasi, der zweitgrößten Stadt in Ghana, ist Ausgangs- und Knotenpunkt für Mobilität und Migration (Foto: Beate Lohnert).



Im traditionellen europäischen Verständnis werden „Stadt“ und „Land“ als klar voneinander abgegrenzte Lebensbereiche aufgefasst. Doch die subsaharischen Länder und Regionen Afrikas bieten viele Beispiele dafür, dass die Unterschiede zunehmend verschwimmen. Ein Grund für diese wachsende Hybridität von städtischen und ländlichen Lebenswelten ist eine hochmobile Bevölkerung, die die Chancen unterschiedlicher Räume miteinander verbindet. Der Wechsel von Wohn- und Arbeitsorten sowie eine damit verbundene Diversifizierung von Einkommensquellen werden als Möglichkeiten genutzt, um soziale und wirtschaftliche Risiken abzufedern. Im Hinblick auf das in den nächsten Jahrzehnten zu erwartende Bevölkerungswachstum kann diese Verflechtung ländlicher und städtischer Räume ein wertvoller Ansatzpunkt für eine nachhaltige Entwicklungsplanung sein.

### Urbaner Wandel in Subsahara-Afrika

Während heute rund 35 Prozent der Bevölkerung in den Ländern Subsahara-Afrikas in Städten leben, wird dieser Anteil nach Schätzungen der Vereinten Nationen bis 2050 voraussichtlich auf 60 bis 70 Prozent ansteigen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Migration aus ländlichen Gebieten, deren Zielrichtung sich allerdings verlagert. Nach Jahrzehnten der Zuwanderung in die großen städtischen Ballungsräume streben Migranten heute vor allem in kleinere Städte mit weniger als 300.000 Einwohnern. Es ist sogar eine Stadt-Stadt-Migration von den Metropolen in diese kleineren urbanen Zentren zu beobachten. Die wichtigsten Gründe für diese Entwicklung sind einerseits die sich verschlechternde Lebensqualität in den Ballungsräumen, andererseits die steigenden Arbeitschancen für Migranten in den kleineren Städten.

Mit der prognostizierten Verdoppelung der städtischen Bevölkerung wird ein weiteres Flächenwachs-

tum der Städte einhergehen. Hier werden – formell und informell – neue Häuser, Wohnungen und Straßen gebaut, die Bodenversiegelung nimmt zu, das Verkehrsaufkommen sowie die dadurch verursachte Luftverschmutzung steigen dramatisch an. Der *Urban sprawl* hat daher langfristig immense Auswirkungen auf die Umweltbedingungen und die Gesundheit der Stadtbewohner. Auch die Sozialstrukturen ändern sich: Das Einkommensgefälle wächst, wohlhabende und arme Bevölkerungsgruppen verteilen sich zunehmend auf räumlich getrennte Bereiche. So entwickelt sich eine ausgeprägte Fragmentierung der Städte in unterschiedliche Stadtteile, die für sich genommen jeweils weitgehend homogen strukturiert sind. Das Bevölkerungswachstum in den Städten führt darüber hinaus zu einer Umwandlung ländlicher Agrarflächen in den Grenzgebieten zwischen Stadt und Land. Damit entfernt sich die ländliche Landwirtschaft immer weiter vom städtischen Markt. Gleichzeitig können sich aber auch neue Möglichkeiten für urbane Landwirtschaft und *Urban Gardening* eröffnen.

### Vom Land in die Stadt – und wieder zurück?

Die Gründe für die Migration aus ländlichen Gebieten in urbane Zentren sind vielfältig: Oft sind es nicht tatsächliche Lohnunterschiede, die die Entscheidung zur Migration beeinflussen, sondern die bloße Möglichkeit, überhaupt ein Einkommen zu finden. Viele ländliche Regionen in Subsahara-Afrika bieten nicht genügend Arbeitsplätze außerhalb der Landwirtschaft. Gutbezahlte Tätigkeiten in der Stadt setzen allerdings vergleichsweise hohe Qualifikationen voraus. Jüngere Menschen werden daher oft zu einem Verwandten in die Stadt geschickt, damit sie hier einen höheren Schulabschluss erreichen oder sogar ein Hochschulstudium absolvieren. Ältere und kranke Menschen hingegen ziehen in die Städte,



■ Abb. 1: Einwohner von Marconi Beam in Kapstadt interpretieren ein Luftbild ihrer Siedlungen. Diese waren auf privatem Grund gebaut worden und mussten deshalb mittlerweile geräumt werden (Foto: Beate Lohnert).



■ Abb. 2 und 3: Der Stadtteil Sea Point (links) und informelle Siedlungen in Marconi Beam (rechts) in Kapstadt: ein Beispiel für die soziale Fragmentierung von Städten in Subsahara-Afrika (Foto links: Andreas Wenzel, Foto rechts: Beate Lohnert).



■ Abb. 4: Skyline von Nairobi (sst).

■ Abb. 5: Erfolgreich in der Metropole: Blick in den iHub Nairobi, ein Zentrum für die junge High-Tech-Community in der kenianischen Hauptstadt (Foto: rvdw images / Shutterstock.com).

weil sie hier eine bessere medizinische Behandlung erwarten.

In vielen Fällen sind es jüngere, besser ausgebildete Frauen, die ihr Leben nicht mehr mit landwirtschaftlicher Arbeit verbringen wollen. Sie ziehen es vor, in der Stadt zu arbeiten und zu heiraten. Gerade die Eheschließung ist für Frauen heute eine starke Motivation, in die Städte überzusiedeln. Umgekehrt ist aber auch eine Scheidung oftmals ein Grund für Frauen, die ländlichen Gebiete zu verlassen. Dies gilt besonders dann, wenn sie in patrilinearen und patrilokalen Verwandtschaftssystemen leben. Hier ist es üblich, dass die Frauen mit ihrem Ehemann und seiner Familie zusammenziehen. Es scheint auch zahlreiche Frauen zu geben, die in der Migration eine Chance sehen, aus einer ungewollten Ehe herauszukommen. Darin zeigt sich, dass Frauen und Mädchen in den subsaharischen Ländern Afrikas ein wachsendes Selbstbewusstsein entwickelt haben. Aufgrund eines verbesserten Zugangs zu den Medien und über bereits migrierte Familienmitglieder haben sie leichteren Zugang zu Informationen, die ihre Lebenssituationen und Aufstiegsmöglichkeiten betreffen. Zudem wurden in vielen Ländern die Bildungsmöglichkeiten für Mädchen langsam aber stetig verbessert.

haben, neigen eher dazu, nach ihrer Berufstätigkeit wieder aufs Land zurückzukehren. Dies gilt ebenso für ungelernete Arbeiter, aber auch für Personen, die auf dem Land Grundstücke und Häuser besitzen. Andererseits bleiben nicht nur viele Migranten, denen ein beruflicher und sozialer Aufstieg in den Städten gelungen ist, hier für immer wohnen. Auch zahlreiche Menschen, die den Erwartungen der zurückgebliebenen Familienmitglieder in Bezug auf Einkommenssteigerung und Aufstiegsfähigkeit nicht gerecht werden konnten, wollen die Städte aus Verlegenheit und in der Hoffnung auf zukünftigen Erfolg nicht verlassen. Indem sie ihr vermeintliches „Scheitern“ aus Scham verschweigen oder ihre prekären Lebensbedingungen beschönigen, tragen sie dazu bei, dass in den ländlichen Gebieten ein ungebrochen positives Bild vom städtischen Leben dominiert. So beeinflussen sie indirekt die Entscheidungsfindung anderer potenzieller Migranten.

## Verflechtungen von Stadt und Land: Wechselnde Wohn- und Arbeitsorte

Ländliche und städtische Gebiete in Subsahara-Afrika sind seit jeher in wirtschaftlicher und sozialer Hinsicht stark miteinander verflochten. Darauf aufbauend, sind wiederholte Wechsel zwischen räumlich weit entfernten Wohn- und Arbeitsorten etablierte Bestandteile afrikanischer Lebensgrundlagen. Die Forschung spricht hier von einer zirkulären Migration, die in alle Richtungen führen kann: vom Land in andere ländliche Gebiete oder in die Stadt, aber auch von der Stadt in andere Städte oder in ländliche Gebiete. In vielen Fällen teilen Familien die Arbeitskapazität ihrer Mitglieder zwischen Migrations- und Nichtmigrationsarbeit auf, um dadurch einen größtmöglichen Nutzen für ihre Haushalte zu erzielen. Sie entscheiden sich dafür, eines oder mehrere Familienmitglieder zeitweilig auf einen Arbeitsmarkt zu schicken, der nicht mit dem lokalen Arbeitsmarkt verbunden ist. Dadurch wird das Portfolio des Familieneinkommens diversifiziert und abgesichert. In einem System wechselseitiger Abhängigkeiten, in dem alle Haushaltsmitglieder den Eindruck haben, von dieser Vereinbarung zu profitieren, können Risiken und Schocks abgefedert werden. Sobald sich allerdings eine Seite benachteiligt fühlt oder aussteigen will, steht der gesamte Vertrag auf dem Spiel.

Zirkuläre Migration ist sehr oft an den Wechsel der Jahreszeiten geknüpft. Für viele Kleinbauern ist es enorm wichtig, dass Familienangehörige aus den Städten in ländliche Gebiete zurückkehren, um in

## „Struktureller Wandel und schnelle soziale Veränderungsprozesse prägen die Entwicklung der Städte in Subsahara-Afrika.“

Wie sich das Leben der Migranten in ihrer neuen städtischen Umgebung gestaltet, wird nicht zuletzt von den Migrantennetzwerken beeinflusst, die sie hier vorfinden und die ein wichtiges soziales Kapital darstellen. Diese Netzwerke dienen den „Neuankömmlingen“ als Anker und Hilfe, so dass sie die Kosten und Risiken der Migration verringern. Auch wenn sie die Tendenz haben, sich durch Institutionalisierung zu verstetigen, bleibt ihre Funktionsfähigkeit von externen Faktoren abhängig – beispielsweise von den Bedingungen auf dem Arbeitsmarkt oder auch der Sicherheitslage in den Städten.

Werden Migranten nach ihrer Einwanderung in die Städte hier auf Dauer bleiben? Oder werden sie sich eines Tages zur Rückkehr in die ländlichen Gebiete entschließen, und – falls ja – unter welchen Voraussetzungen? Die Forschung hat sehr verschiedene Faktoren identifiziert, die über allgemeine wirtschaftliche Überlegungen hinaus für diese Entscheidung wichtig sind. Ältere Menschen, die einen Anspruch auf Rente oder eine andere Altersversorgung

### LITERATURTIPPS

M. B. Mekonnen, B. Lohnert: *Diaspora engagement in development: The case of Ethiopian diaspora associations based in Germany*. African Diaspora (2018). DOI: 10.1163/18725465-01001002.

B. Lohnert: *Migration and the rural-urban transition in Sub-Saharan Africa*. Berlin, Centre for Rural Development 2017.

B. Lohnert: *Subsaharisches Afrika*. Braunschweig 2014.



Zeiten von Arbeitsspitzen in der Landwirtschaft zu helfen. Die Arbeitsnachfrage unterscheidet sich dabei nach den angebauten Kulturen und den klimatischen Bedingungen in der jeweiligen Region. Allerdings bieten eine verbesserte Verkehrsinfrastruktur und sinkende Transportkosten den Migranten vom Land die Möglichkeit, sich in Städten niederzulassen, die sehr weit vom ländlichen Wohnort der eigenen Familie entfernt sind. Die Wanderungsdistanzen nehmen zu, so dass Migranten dann nicht immer in der Lage sind, für die landwirtschaftliche Saison nach Hause zu kommen. Umgekehrt variiert auch die Nachfrage nach Arbeitskräften in den Städten mit den Jahreszeiten. Sie ist beispielsweise in der Baubranche außerhalb der Regenzeiten besonders hoch.

Eine andere Art von saisonaler Migration findet zwischen ländlichen Gebieten mit unterschiedlichen klimatischen und agrarökologischen Zonen statt. Wenn die Nachfrage nach Arbeitskräften in der heimischen, kleinbäuerlich geprägten Landwirtschaft gering ist, ziehen die Migranten in Zeiten hoher Nachfrage auf große landwirtschaftliche Betriebe um. Diese Art der Land-Land-Migration ist beispielsweise charakteristisch für Sambia, wo die Zuckerrohrplantagen auf zusätzliche Erntehelfer angewiesen sind, oder für Benin mit seinen großen Baumwollfeldern.

## Ausblick

Struktureller Wandel und schnelle soziale Veränderungsprozesse prägen die Entwicklung der Städte in Subsahara-Afrika. Obwohl sich in Subsahara-Afrika die Migration vom Land in die Stadt als treibende Kraft für das städtische Wachstum abgeschwächt hat, werden sowohl ländliche als auch städtische Gebiete ein beträchtliches Bevölkerungswachstum verzeichnen. Voraussichtlich wird es noch über lange Zeit für viele Haushalte eher die Regel als die Ausnahme sein, die Einkommensproduktion auf verschiedene Wirtschaftszweige und Standorte zu verteilen. Vor allem für die jüngere Generation ist das Risiko der Unterbeschäftigung hoch. Bereits heute übersteigt die Nachfrage nach Beschäftigung das Angebot in den subsaharischen Städten. Ein substanzieller Wandel ist innerhalb des nächsten Jahrzehnts nicht sehr wahrscheinlich. Daher ist es wichtig, dass städtische und ländliche Gebiete zusammen als interagierende Einheiten aufgefasst werden. Investitionen in die Landwirtschaft und Beschäftigungsmöglichkeiten auf dem Land sind ebenso erforderlich wie weitblickende Planung und Investitionen in nachhaltige Erwerbszweige in den Städten.

Ebenso ist zu beachten, dass die räumlichen Muster und treibenden Kräfte von Migrationsbewegungen einem langfristigen Wandel unterliegen. Werte und Normen ändern sich ebenso wie die Rahmenbedingungen. Veränderte Sicherheitslagen, weltweite oder regionale Wirtschaftskrisen, Klimaänderungsprozesse und die Dynamiken der Bevölkerungsentwicklung sind nur einige der Faktoren, die in Zukunft erhebliche Auswirkungen auf lokale, regionale und internationale Migrationsprozesse haben werden.

■ Abb. 6: Umzugswagen auf einer Landstraße in Südafrika (Foto: Beate Lohnert).

■ Abb. 7: Traditionelle Hütten in einem Dorf in Äthiopien (sst).

## AUTORIN



■ Prof. Dr. Beate Lohnert ist Inhaberin des Lehrstuhls für Geographische Entwicklungsforschung an der Universität Bayreuth.

■ Abb. 8: Ernte auf einem Baumwollfeld in Benin (Cora Unk Photo / Shutterstock.com).





■ Gabriele Obermaier  
Gabriele Schrüfer

# Wechselnde Perspektiven

Raumwahrnehmungen und Bewertungen im Geographieunterricht

■ Schülerinnen und Schüler müssen für verschiedene Raumkonzepte sensibilisiert sein, damit sie gesellschaftspolitische Vorgänge in ihrer Multiperspektivität begreifen können (sst).

Die Fähigkeit zum Perspektivwechsel nimmt im Zeitalter der Globalisierung, die mit einer zunehmenden Komplexität der Welt einhergeht, eine immer wichtigere Rolle ein. Wer in der Lage ist, unterschiedliche und sogar gegensätzliche Raumwahrnehmungen mit kritischem Bewusstsein zu erkennen und zu hinterfragen, ist auch dazu fähig, verschiedene Sichtweisen als gleichberechtigt anzuerkennen und Unsicherheiten auszuhalten. Die Reflexion der eigenen sozialisationsbedingten, nur vermeintlich „unverrückbaren“ Perspektive auf den Raum und auf Räume bildet dafür die Grundlage.

## Die Rolle der Raumwahrnehmung und der Bewertung

Unser Bewerten und Urteilen wird entscheidend durch Wahrnehmungen geprägt. Dabei sind Wahrnehmungen, auch Wahrnehmungen von Räumen, individuell sehr unterschiedlich. Erheblich beeinflusst werden (Raum)wahrnehmungen und Bewertungen durch die Sozialisation und die damit verbundenen Werte und Normen. Werte und ihre Hierarchisierung werden meist unreflektiert im Sozialisationsprozess erworben. Sie bilden unsere unbewusste Ordnungs- und Orientierungsmatrix, vor deren Hintergrund wir Bewertungen und Handlungen vornehmen. Die Fähigkeit zum Perspektivwechsel hängt nun entscheidend davon ab, dass Werte nicht als universal gesehen, sondern in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Bezugssystem verstanden werden. Um andere Wahrnehmungen und deren Einflüsse auf Bewertungen akzeptieren zu können, ist es des-

halb wesentlich, für die Wirkungs- und Steuerungsmacht von Werten sensibilisiert zu sein. Nur dann werden Toleranz und Kritikfähigkeit entwickelt, und es entsteht ein demokratisches Grundverständnis.

## Die vier Raumkonzepte in der Geographie

Für viele ist die Erkenntnis, dass Räume nicht „objektiv“ vorhanden sind, sondern ein Produkt von subjektiven Wahrnehmungen und Konstruktionsprozessen darstellen, überraschend. Lange Zeit war es üblich, Räume als Container oder als Systeme von Lagebeziehungen zu betrachten, die unabhängig vom eigenen Standpunkt objektiv gegeben sind. Seit den 1980er Jahren kamen in der Geographie

„Kinder und Jugendliche sollen sich mit ihren eigenen Bewertungssystemen auseinandersetzen und sich dabei ihrer ‚kulturellen Brille‘ bewusst werden.“

zwei weitere Betrachtungsweisen hinzu: Räume wurden jetzt auch als Kategorie der Sinneswahrnehmung und als Konstrukt aufgefasst. Dabei sind diese vier, von der Geographin Ute Wardenga unterschiedenen Betrachtungsweisen durchaus miteinander kombinierbar. Die Wahrnehmung und die Konstruktion von Räumen müssen zusammen gedacht werden, da sie sich wechselseitig beeinflussen. Nur analytisch ist eine Trennung möglich.

### Vier Raumbegriffe

#### • Räume als Container

Räume werden als Behälter betrachtet, in denen bestimmte Sachverhalte der physisch-materiellen Welt enthalten sind. Sie werden als Wirkungsgefüge natürlicher und anthropogener Faktoren verstanden: als das Ergebnis von Prozessen, die eine Landschaft gestalten, oder als Betätigungsfeld von Menschen.

#### • Räume als Systeme von Lagebeziehungen

Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt hierbei auf der Bedeutung von Standorten, Lage-Relationen und Distanzen. Damit ist die Frage verknüpft, was diese Sachverhalte für die vergangene und gegenwärtige Wirklichkeit bedeuten.

#### • Räume als Kategorie der Sinneswahrnehmung

Hier steht die Frage im Mittelpunkt, wie scheinbar objektiv gegebene Räume von Individuen, Gruppen oder Institutionen gesehen und bewertet werden. Die Welt wird durch die räumliche Einordnung von Wahrnehmungen differenzierter, es gibt nicht mehr die *eine* reale Welt.

#### • Räume als Konstrukt

Die konstruktivistische Perspektive geht davon aus, dass Räume „gemacht“ werden. Die Aufmerksamkeit richtet sich deshalb darauf, wer unter welchen Bedingungen, aus welchem Interesse und auf welche Weise über bestimmte Räume kommuniziert und sie durch Handeln (re)produziert.

### LITERATURTIPPS

G. Schrüfer: Konflikte im Geographieunterricht, in: M. Rolfes und A. Uhlenwinkel (eds.): Metzler Handbuch 2.0 Geographieunterricht. Braunschweig 2013, 350-357.

G. Schrüfer, G. Obermaier, S. Schwarze: Raumwahrnehmung aus unterschiedlichen Perspektiven am Beispiel Tansania – Empirische Untersuchungen und Konsequenzen für den Geographieunterricht. GW-Unterricht (2016), 142, 91-101.

■ Quelle: Ute Wardenga: Alte und neue Raumkonzepte für den Geographieunterricht. *Geographie heute* (2002), 23 (200), 8-11.

- 1 G. Schrüfer 2013: siehe Literaturtipps, S. 124.
- 2 Vgl. G. Schrüfer, G. Obermaier, S. Schwarze 2016: siehe Literaturtipps.

## AUTORINNEN



■ Prof. Dr. Gabriele Obermaier ist Professorin für Didaktik der Geographie an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Gabriele Schrüfer ist Inhaberin des Lehrstuhls für Geographiedidaktik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Von 1999 bis 2010 war sie in Lehre und Forschung an der Universität Bayreuth tätig.

Für den Geographieunterricht stellt sich daher die Aufgabe, Schülerinnen und Schüler explizit für die verschiedenen Raumkonzepte zu sensibilisieren. Diese Sensibilisierung bildet die Grundlage dafür, dass viele gesellschaftspolitische und raumbezogene Vorgänge in ihrer Multiperspektivität verstanden werden können. Die Fokussierung auf Vielschichtigkeit und Multiperspektivität sowie die Fähigkeit zu einem Perspektivwechsel ermöglichen einen „zweiten“, weniger emotionalen Blick auf betreffende Sachverhalte. Konflikte, die durch unterschiedliche wertebasierte Wahrnehmungen oder Bewertungen entstehen, könnten so entschärft werden.

### Wahrnehmungsvergleiche sensibilisieren für unterschiedliche Wertmaßstäbe

Vorstellungen von „Afrika“, wie sie in vielen Köpfen vorherrschen, haben sich in den letzten Jahrzehnten kaum verändert. Sie spiegeln nach wie vor gängige Stereotype und Vorurteile gegenüber unserem Nachbarkontinent wider. Sie sind geprägt durch Assoziationen von in den Medien vermittelten Kriegen, Krisen, Katastrophen und Krankheiten. Im Kontrast dazu werden sie teilweise von romantisierenden Vorstellungen begleitet, die vor allem durch Romane, Kino- und Fernsehfilme weitergegeben werden.

Die Betrachtung des Raums als Wahrnehmungsraum und als Konstrukt eröffnet im Geographieunterricht nun die Möglichkeit, Schülerinnen und Schüler in die Lage zu versetzen, ihre eigenen Bilder im Kopf ebenso wie die Bilder in Medien zu reflektieren und kritisch zu hinterfragen. Wahrnehmungen von Räumen „Afrikas“ müssen auf ihre Mehrperspektivigkeit hin durchleuchtet, Konstruktionsprozesse mitsamt ihrer möglichen Intentionen bewusst gemacht werden. Die Ausbildung von Bewertungskompetenz bei Schülerinnen und Schülern ist daher ein wichtiges Unterrichtsziel. Kinder und Jugendliche sollen sich mit ihren eigenen Bewertungssystemen auseinandersetzen und sich dabei ihrer „kulturellen Brille“ bewusst werden, durch deren Werte und Normen sie zu beurteilen gelernt haben. Um dieser Forderung nachzukommen, bietet es sich an, verschiedene Wahrnehmungen und Bewertungen von Räumen zu vergleichen. Dabei sollen die Lernenden erkennen, dass „die Grundannahmen der eigenen Gesellschaft [...] nicht so fest und unverrückbar sind, wie sie aus einer kulturellen Innenperspektive erscheinen“.<sup>1</sup>

Ein Team der Universitäten Bayreuth und Münster hat daher Unterrichtsmaterialien konzipiert und

evaluiert mit dem Ziel, Schülerinnen und Schüler in die Lage zu versetzen, die eigene Perspektive zu reflektieren und verschiedene Sichtweisen als gleichberechtigt anzuerkennen.<sup>2</sup> Die Fähigkeit, die eigene Wahrnehmung als sozialisationsbedingt zu verstehen, steht dabei ebenso im Mittelpunkt wie die Fähigkeit, die Bedeutung eigener Werte und Normen beim Bewerten von Räumen und Situationen zu erkennen. Schülerinnen und Schüler setzen sich mit ihren eigenen Bewertungssystemen auseinander, indem sie hinterfragen, wie der jeweilige Raum von ihnen und von anderen Personen wahrgenommen wird. Es wird deutlich, dass ein und derselbe Raum ganz unterschiedlich betrachtet und beurteilt werden kann. Zwei Bilder (Abb. 1 und 2), die in Tansania aufgenommen wurden, sollen dies verdeutlichen: In Interviews wurden Personen aus unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen Tansanias gebeten, zu beschreiben und zu begründen, wie sie diese Bilder wahrnehmen und die Situation bewerten. Die Antworten lassen sich so zusammenfassen:

**Abb. 1:** *Man erkennt ein unfertiges Gebäude, das von der Struktur und Lage her ein Laden sein könnte. Dies wird durch die beiden Eingangstüren sichtbar. Der Hausbau zieht sich in der Regel über einen längeren Zeitraum hin, oft über viele Jahre, weil schrittweise immer dann gebaut wird, wenn Geld zur Verfügung steht. Deshalb kann es passieren, dass sich Pflanzen, wie hier im Bild, im Rohbau ansiedeln. Die Gründe für den schrittweisen Bau sind vielfältig: Es ist nahezu unmöglich, genügend Geld für einen kompletten Hausbau zu sparen, denn gespartes Geld muss meistens mit Familienmitgliedern in Not geteilt werden. Bausparkassen stehen nicht zur Verfügung, und von der Bank können mangels Kreditwürdigkeit keine größeren Summen geliehen werden. Da die Preise für die Baumaterialien durch die Inflation fast täglich steigen können, steckt man alles Geld sofort in den Bau – selbst wenn die Summe nur für einen Sack Zement oder ein paar Ziegelsteine reicht. Ein derartiger Rohbau ist daher eher ein Zeichen von Wohlstand.*

**Abb. 2:** *Das Foto zeigt einen normalen Möbelverkauf. Die Tansanier würden hier auf jeden Fall ihre Möbel kaufen. Das ist sehr üblich. Man geht los, kauft sie hier und dann werden sie schön poliert nach Hause gebracht. Diese Möbel sind auch stabiler, da sie aus richtigem Holz hergestellt sind, die anderen sind nur aus einfachem Holz, das mit Chemikalien vermischt wurde. Wenn die Möbel innen stehen, wird sie niemand sehen. Leute werden davon angezogen, wenn sie etwas sehen. Es ist also sehr clever für das*

*Geschäft, es ist wie „Werbung machen“. Die Möbel werden von jungen Tansaniern hergestellt. Vor allem chinesische Produkte sind eine große Konkurrenz und nehmen den jungen Menschen in Tansania die Arbeitsplätze. Die Kreativität und die berufliche Selbstständigkeit sind beeindruckend. In diesem Teil des Landes sind Arbeitsplätze rar. Ohne Arbeit und Geld besteht die Gefahr einer religiösen Radikalisierung, die in den Terrorismus münden kann.*

Im Geographieunterricht erhalten Schülerinnen und Schüler in einem ersten Schritt eines der beiden Fotos. Sie werden aufgefordert, es in Einzelarbeit zu beschreiben und die Situation zu bewerten. In einem nächsten Schritt werden in Kleingruppen Unterschiede und Gemeinsamkeiten der eigenen Wahrnehmungen herausgearbeitet und diskutiert. Hier wird bereits deutlich, dass Wahrnehmungen unterschiedlich sein können. Typische Äußerungen von Schülerinnen und Schülern lauten:

**Abb. 1:** *„Dies ist ein angefangenes Haus in schlechten wirtschaftlichen bzw. ärmlichen Verhältnissen, das nicht schön ist und nicht fertig gestellt wird und daher eher Platzverschwendung darstellt. In Deutschland herrscht dagegen mehr Luxus.“ – „Das ist ein altes, verfallenes Steingebäude mit Pflanzenbewuchs, das man als Schabracke bezeichnen kann. Der Zustand und Verfall des Gebäudes zeugen von der Armut der Menschen.“ – „Also ich glaube, das war früher mal ein Haus und ich glaube, das ist durch Bomben oder so beschädigt worden und ist jetzt kaputt. Die Menschen tun mir leid, die davor drin gewohnt haben.“ – „Der Müll sollte entfernt werden, damit die Umwelt nicht verschmutzt wird, und man sollte etwas gegen den Krieg tun.“*

**Abb. 2:** *„Also das sieht jetzt ein bisschen so aus wie Sperrmüll oder so Ähnliches.“ – „Ich glaube, dass das schon eher eine Wohnung ist. Und ich glaube, dass die da auch leben, und weil die da drin auch nicht genug Platz haben, dass die es dann nach draußen gestellt haben.“ – „Und zwei Jungen, die gerade spielen, glaube ich. (...) Aber es kann auch sein, dass sie kein Zuhause haben.“ – „Weil das ist einfach alles so arm. (...) Das ist irgendwie nicht so [gut]. (...) Andere würden es auch als asozial bezeichnen.“*

Abschließend vergleichen die Schülerinnen und Schüler ihre eigenen Wahrnehmungen mit den Wahrnehmungen von Personen aus Tansania. Dadurch wird deutlich, dass sich ihre eigenen Wahrnehmungen teilweise stark von den Beschreibungen und Bewertungen anderer unterscheiden. Entschieden



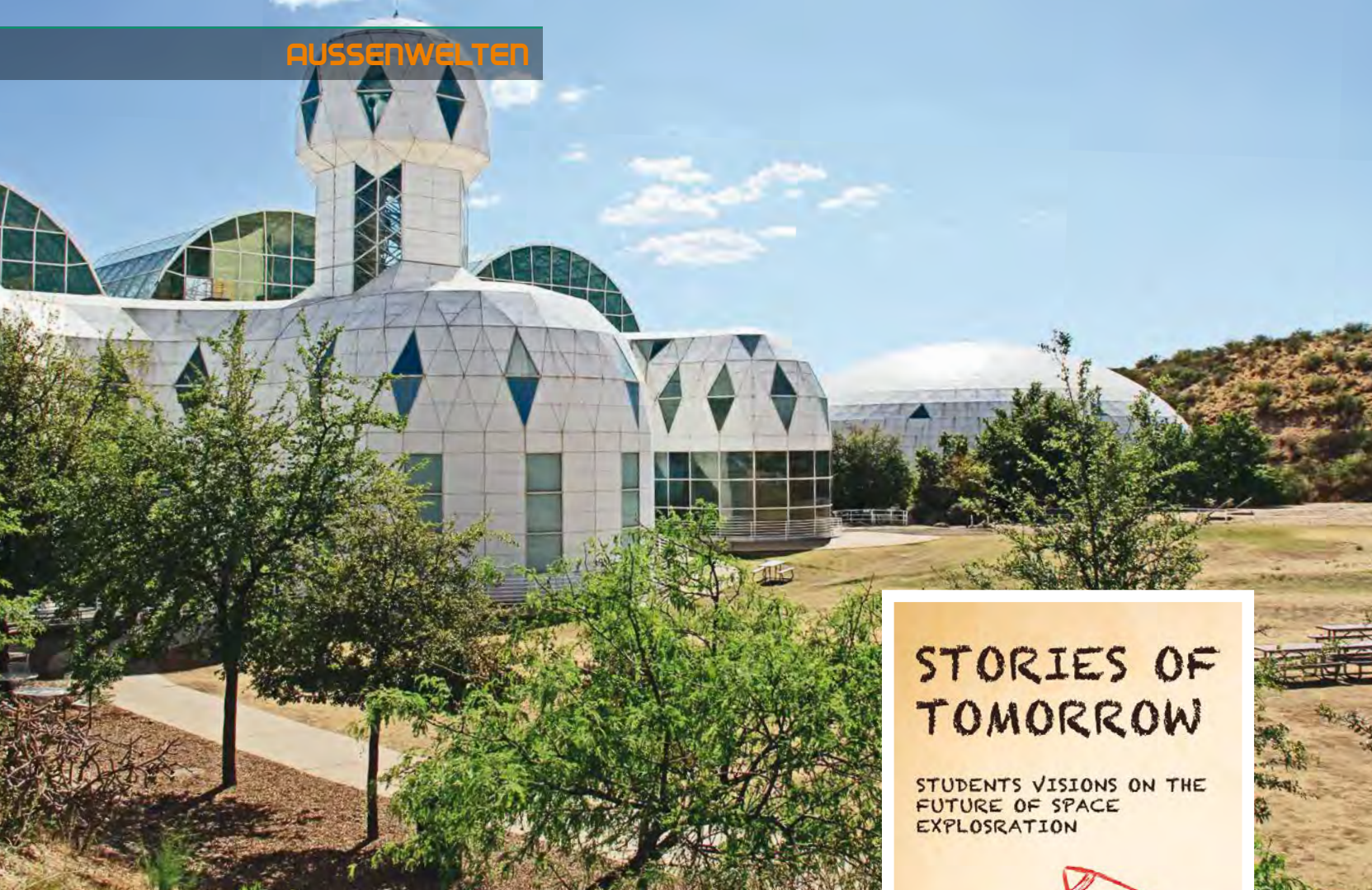
■ Abb. 1: Hausbau bei Arusha/Tansania (Foto: Gabriele Schrüfer).

ist nun, dass gemeinsam Gründe für unterschiedliche Wahrnehmungen diskutiert werden, so dass die Kinder und Jugendlichen erkennen, welche Rolle Sozialisation und tradierte Wertmaßstäbe spielen.

Die Evaluationen haben gezeigt, dass gerade der Vergleich eigener Wahrnehmungen und Bewertungen mit den teilweise unterschiedlichen Wahrnehmungen und Bewertungen anderer Personen bei Schülerinnen und Schülern zu einem Aha-Erlebnis führt. Dies motiviert sie sehr, darüber nachzudenken, welche Gründe es für diese Unterschiede geben könnte. Auch wenn eine solche Unterrichtseinheit allein nicht ausreicht, um die Fähigkeit zum Perspektivwechsel nachhaltig zu stabilisieren, gelingt es doch, Schülerinnen und Schüler so zu sensibilisieren, dass sie verschiedene Sichtweisen als solche erkennen und kritisch hinterfragen.

■ Abb. 2: Möbelverkauf in Arusha/Tansania (Foto: Gabriele Schrüfer).





■ Franz X. Bogner

# Auf ins Weltall!

Ein EU-Projekt lässt Schülerinnen und Schüler eigene Marsflüge planen

■ Biosphere-2, ein künstliches Ökosystem in der Wüste Arizonas (Lindasj22 / Shutterstock.com).  
Kleines Bild: Logo des Projekts STORIES OF TOMORROW.





Expeditionen zum Mars so zu planen, als ob sie in naher Zukunft verwirklicht werden können – dies ist die Aufgabe, die Schülerinnen und Schüler im EU-Projekt STORIES OF TOMORROW mit Pionier- und Forschergeist angehen. In diesem Verbundprojekt für den MINT-Unterricht arbeiten 16 Partnerinstitute zusammen: 12 aus Europa sowie vier aus den USA, Australien und Japan. Das Vorhaben ist auf drei Jahre ausgelegt und wird vom Lehrstuhl für Didaktik der Biologie an der Universität Bayreuth koordiniert. Zielgruppe der Unterrichtsentwicklung sind sechste Klassen vor dem Hintergrund, dass dies fast überall in Europa die letzte Jahrgangsstufe vor dem Übertritt in Sekundärstufen ist. In Grundschulen ist noch das Klassenlehrerprinzip verwirklicht, es gibt also noch keine eigenen Lehrkräfte in MINT-Fächern. An diesen Zustand will STORIES OF TOMORROW anknüpfen, um junge Menschen frühzeitig für Naturwissenschaften zu begeistern. Das Projekt setzt dabei auf einen schuljahresübergreifenden freiwilligen Nachmittagsunterricht, in dem Sechstklässler sich mit einem europaweit gemeinsamen Unterrichtsthema auseinandersetzen: der Organisation eines Flugs zum Mars.

### Forschendes Lernen

Der Schlüssel für dieses imaginäre Vorhaben ist das forschende Lernen (*Inquiry-Based Learning*). Es soll der Arbeitsweise eines Wissenschaftlers folgen, der Schritt für Schritt auf Tatsachen basierende Erklärungen ableitet. In ähnlicher Weise sollen sich Kinder und Jugendliche Wissen aneignen und dabei zugleich ein Verständnis für wissenschaftliche Ideen sowie für die Art und Weise, wie Wissenschaftler arbeiten, entwickeln. Sie können und sollen eigenständige Fragen stellen, Antworten vorschlagen, Untersuchungen planen und ausführen, Tatsachen sammeln, darauf aufbauend eine Erklärung ausarbeiten und diese dann ihren Klassenkameraden erläutern. Besonders positiv kann die Wirkung des forschenden Lernens auf Schülerinnen und Schüler sein, die mit normalem Unterricht nicht oder nur schwer zu erreichen sind. Insbesondere profitieren auch Mädchen vom forschenden Ansatz, die sich im herkömmlichen naturwissenschaftlichen Unterricht häufig zurückziehen. Das Projekt bietet allen die Chance, ihre Neugier aus den ersten Grundschulklassen wieder zu entdecken.

### Digitales Lernen von Tucson bis Tokio

STORIES OF TOMORROW will das digitale Lernen ins Klassenzimmer bringen. Es ist eines der ICT-Projekte

der Europäischen Union, die Abkürzung steht für *Information and Communications Technology*. Zwar gibt es – vor allem von fachfremder Seite – einige bedenkliche Stimmen gegen das digitale Lernen, aber fundierte empirische Belege haben sie bisher nicht beibringen können. Richtig angewandt können digitale Module durchaus innovative und fruchtbare Erweiterungen in den Unterricht bringen. Digitales Lernen soll ja keineswegs den bisherigen MINT-Unterricht ersetzen, sondern neue Impulse setzen und im Klassenzimmer Horizonte öffnen, die den Kindern und Jugendlichen sonst verschlossen blieben. Sehr viele Unterrichtseinheiten können dabei von außen in den Unterricht geholt werden – und zwar von schon existierenden Klassenzimmern, die allerdings in den meisten Fällen weit entfernt sind. Gerade in dieser Hinsicht erschließt der Umgang mit digitalen Kommunikationstechniken neue Perspektiven für den Unterricht.

### “Ein Projekt für die Welt im 21. Jahrhundert.“

Ein Beispiel dafür ist *Biosphere-2*, ein künstliches Ökosystem mitten in der Wüste Arizonas. Es wurde in den 1980er Jahren errichtet, um zu beweisen, dass Astronauten in einem geschlossenen ökologischen System langfristig überleben können. Zu diesem Zweck wollte man Langzeitreisen im Weltraum oder sogar das Leben in Weltraum-Kolonien simulieren. Zu Beginn der 1990er Jahre war ein erster Testversuch zwar gescheitert, der riesige Gebäudekomplex von *Biosphere-2* ist aber immer noch ein Ort intensiver Forschung. Der große Glaskuppelbau des Experiments besteht aus einem umbauten Raum von gut 200.000 Kubikmetern. Das geschlossene Ökosystem umfasst eine Savanne, einen Ozean, einen tro-

### AUTOR



■ Prof. Dr. Franz X. Bogner ist Inhaber des Lehrstuhls für Didaktik der Biologie an der Universität Bayreuth.

### LITERATURTIPP

F. X. Bogner, V. Ulm: Forschendes Lernen. Die Universität Bayreuth – ein Innovationszentrum für das Bildungssystem. Spektrum 2016/1 der Universität Bayreuth, 14-17.

■ Abb. 1: STORIES OF TOMORROW: Koordinatoren, Lehrkräfte, Schülerinnen und Schüler bei einem Projekttreffen im Forschungszentrum Biosphere-2 in Tucson/USA (Foto: Biosphere-2 / K. Bonine).



■ Abb. 2: Messung des Schattenwurfs (Foto: © Eratosthenes Experiment).

pischen Regenwald, einen Mangrovensumpf, eine Wüste sowie ein Areal mit intensiver Landwirtschaft. Aber selbst für Schülerinnen und Schüler aus Tucson, der Hauptstadt Arizonas, ist *Biosphere-2* schon zu weit entfernt, um direkt vor Ort genutzt werden zu können. Deshalb besteht ein starkes Interesse an anderen Möglichkeiten, die gewaltigen Chancen der Anlage für die Schule und für *Outreach*-Programme zu nutzen. Die University of Arizona als Eigentümer von *Biosphere-2* bot sich somit als idealer Partner für *STORIES OF TOMORROW* an.

Ein weiteres Beispiel für vernetztes digitales Lernen ist das weltweite Eratosthenes-Experiment, das die Bayreuther Didaktik der Biologie bereits in einem früheren EU-Projekt angestoßen hat. Der griechische Gelehrte Eratosthenes (273-192 v. Chr.) hatte vor gut 2.200 Jahren, zur Blütezeit der hellenistischen Wissenschaften, in einem einfachen Schattenmess-Experiment den Erdumfang berechnet. Seit mittlerweile sieben Jahren messen nun Tausende von Schülerinnen und Schülern in der ganzen Welt die Schattenlänge eines Ein-Meter-Stocks genau um 12 Uhr mittags am Frühlingsanfang (21. März). Daraus können sie, wie das antike Vorbild, nach entsprechender Vorbereitung den Erdumfang berechnen: Dabei lernen sie nicht nur genaues Messen, sondern müssen auch zur Kenntnis nehmen, dass ihre Messergebnisse oft weit über 15 Prozent streuen. Wenn sie jedoch die Möglichkeit nutzen, sich mit Mitschülern in anderen Ländern auszutauschen, minimiert sich dieser Rechenfehler auf unter 1,5 Prozent. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn ägyptische, griechische und finnische Schulen zusammenarbeiten. In Athen beträgt der Schattenwurf 71 Zentimeter bei einem Winkel von 35,5 Grad, in Helsinki sind es dagegen 160 Zentimeter bei einem Winkel von 58 Grad. Alexandria, der Ort des historischen Experiments, bringt es auf 55,5 Zentimeter und einen Winkel von



29 Grad. Kinder und Jugendliche erfahren so in einem einzigen synchronen Experiment: Es lohnt sich, über Ländergrenzen hinweg miteinander zu arbeiten.

Ein weiteres außerschulisches Klassenzimmer steht in der *Cité de l'Espace* (deutsch: „Weltallstadt“) im französischen Toulouse zur Verfügung. In dieser Hauptstadt der europäischen Luft- und Raumfahrt ist nicht nur die 55 Meter hohe Ariane 5 zu besichtigen. Ein 3,5 Hektar großer Park mit 2.000 Quadratmetern Ausstellungsfläche zeigt zudem alles, was die Raumfahrt seit fast 70 Jahren hervorgebracht hat. Hier kann man beispielsweise die erschreckend beengenden Raumverhältnisse, wie sie in der sowjetischen Raumstation Mir geherrscht haben, hautnah erleben. Das Besondere der *Cité de l'Espace* sind die reich ausgestatteten Klassenzimmer, in denen Kinder und Jugendliche einen ganzen Schultag lang wie Astronauten Experimente durchführen und sich mit den Problemen eines Aufenthalts im Weltraum auseinandersetzen können. Allerdings gilt auch hier – wie schon bei *Biosphere-2* – die Einschränkung, dass

■ Abb. 3 und 4: Auf dem Gelände der Cité de l'Espace in Toulouse. Links ein Modell der sowjetischen Raumfähre Mir, rechts ein Blick auf das 55 Meter hohe Modell der europäischen Trägerrakete Ariane 5 (Foto links: Mike Peel / wikimedia commons / CC-BY-SA-4.0; Foto rechts: Ministerio de Defensa de Perú / wikimedia commons / CC-BY-2.0).



diese wunderbaren didaktischen Gelegenheiten an einem Ort angeboten werden, der für die meisten Kinder und Jugendlichen in Europa unerreichbar weit entfernt ist. Das Lehr-Lern-Portal von STORIES OF TOMORROW bietet deshalb an, dass französische Schülerinnen und Schüler ihre Mitschüler in anderen Ländern an Experimenten teilhaben lassen können. Authentizität lässt sich so europaweit transportieren.

Ein ganz besonderer Projektpartner kommt aus Japan: Hier ist neuerdings das *National Astronomical Observatory (NAOJ)* in Tokio in die internationale Zusammenarbeit eingebunden. So werden demnächst auch japanische, europäische und amerikanische Schülerinnen und Schüler kooperieren: ein Novum unter den bislang 20 EU-Projekten, die seitens der Bayreuther Biologie-Didaktik bisher betreut wurden.

### Grenzenloser Pioniergeist

STORIES OF TOMORROW ist somit ein Projekt, das in zweifacher Hinsicht Grenzen von Zeit und Raum überschreitet: Das digitale Lernen versetzt die Schülerinnen und Schüler in die Lage, sich mit modernen Kommunikationstechniken zu vernetzen und wissenschaftliche Ressourcen aus Forschungseinrichtungen anderer Länder ins eigene Klassenzimmer zu holen. Dabei vereint sie das gemeinsame Engagement für das imaginäre Vorhaben, in den Weltraum aufzubrechen und den Planeten Mars zu erkunden. So können Kinder und Jugendliche aus Portugal und aus Arizona/USA „digitale Brücken“ schlagen, um *Biosphere-2* in ein Pilotprojekt für einen Langzeitflug zum Mars einzubauen. Schülerinnen und Schüler aus Griechenland können zusammen mit SPACE-Experten in Frankreich planen, wie ein Leben auf einer Marsstation organisiert werden sollte. STORIES OF TOMORROW ist buchstäblich ein Projekt für die Welt im 21. Jahrhundert.

In diese Grenzen überschreitende internationale Zusammenarbeit sind auch die Koordinatoren des Projekts und die Leitungen der beteiligten Forschungseinrichtungen einbezogen. So kooperiert der Lehrstuhl für Didaktik der Biologie der Universität Bayreuth mit dem NAOJ in Tokio, das über breit ausgearbeitete Unterrichtsmaterialien verfügt. In diese Kooperation ist auch die Pädagogische Universität Wakayama eingebunden. Eine Evaluationsplattform, die von den zwei Partneruniversitäten gemeinsam betrieben wird, ermöglicht im weiteren Projektverlauf valide Vergleiche – insbesondere wenn es um die Frage geht, wie Schülerinnen und



■ Abb. 5: Treffen der Projektpartner auf dem Gelände der Cité de l'Espace in Toulouse. Im Hintergrund das Modell der Ariane 5, die im Auftrag der Europäischen Weltraumorganisation ESA entwickelt wurde (Foto: LS Didaktik der Biologie, Bayreuth).

Schüler in beiden Ländern durch einzelne Projektbausteine erreicht werden können. Für STORIES OF TOMORROW ist der japanische Beitrag auch in dieser Hinsicht eine große Bereicherung.

### Ein europäisches Schulnetzwerk

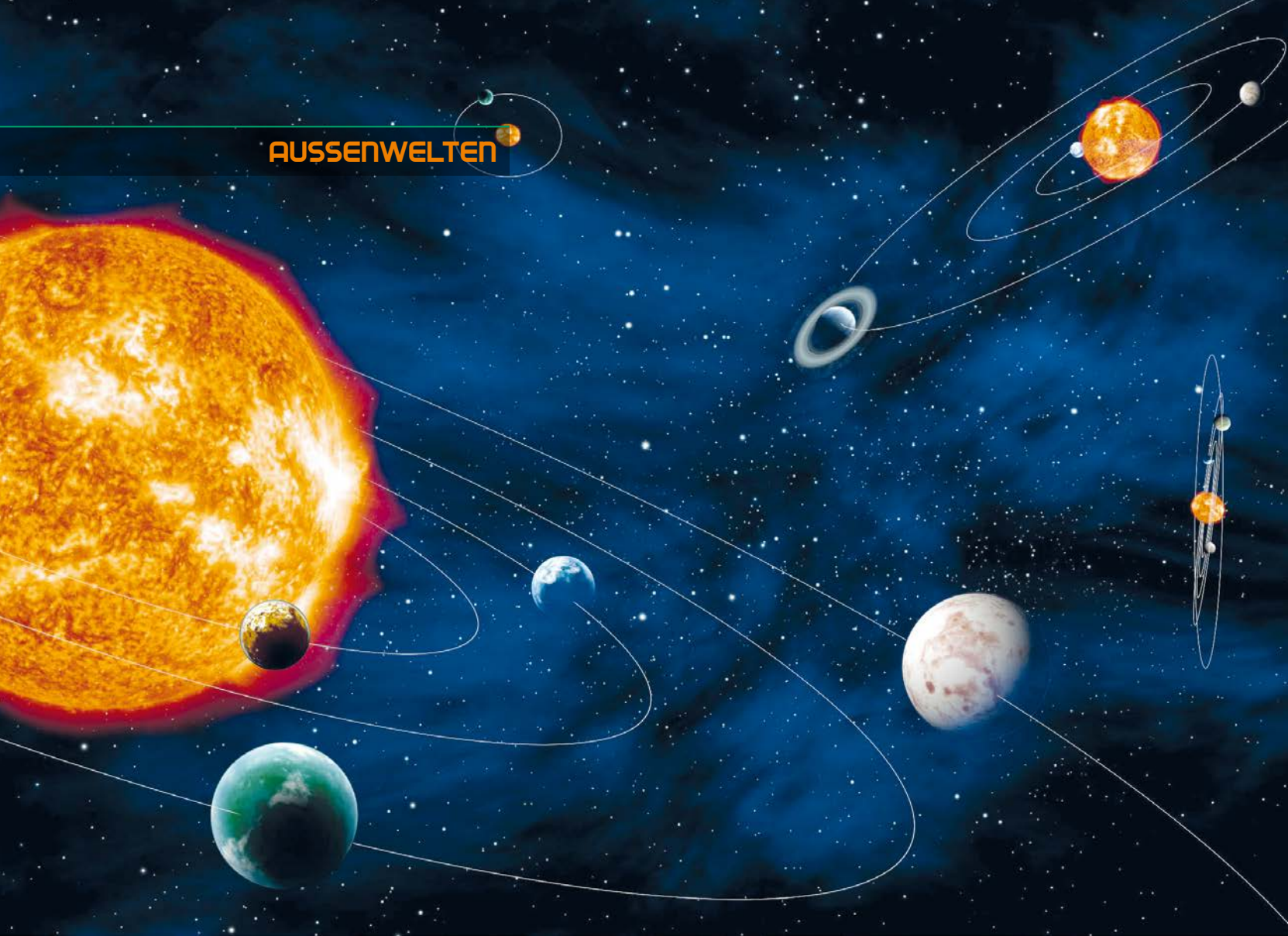
Ausgemachtes Ziel von STORIES OF TOMORROW ist es, ein bestehendes europäisches Schulnetzwerk weiter zu verstärken. Schulen in Bayern sind eingeladen, die Ressourcen des dreijährigen Projekts zu nutzen und an einem europaweiten Schulvorhaben teilzunehmen. Ein eigener Mars-Flug wird daraus nicht werden, aber dessen digitale Planung wird neue Herausforderungen in die Klassenzimmer bringen – für die Kinder und Jugendlichen ebenso wie für ihre Lehrkräfte. STORIES OF TOMORROW wird helfen können, kindliche Begeisterung am Experimentieren bis ins Erwachsenenalter lebendig zu halten. Die Einladung zum Mitmachen steht!



■ Abb. 6: Der Mars, aufgenommen von der europäischen Raumsonde Rosetta (Foto: ESA - European Space Agency & Max-Planck Institute for Solar System Research for OSIRIS Team / wikimedia commons / CC-BY-SA-3.0).



■ Abb. 7: Digitales Lernen in der Schule (sst).



■ Gerd Steinle-Neumann  
Florian Trybel

# Exoplaneten

Bunte Welten jenseits unseres Sonnensystems

■ Die Europäische Weltraumorganisation ESA wird sich in den kommenden Jahren weiterhin intensiv an der Suche nach Planeten außerhalb des Sonnensystems beteiligen. Für 2026 ist der Start der Weltraummission PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of Stars) geplant (Grafik: © ESA - C. Carreau).

Exoplaneten sind Planeten außerhalb unseres Sonnensystems. Mehr als 3.700 von ihnen sind bisher bekannt. Mit dem im April 2018 gestarteten Weltraumteleskop TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) hat die NASA ein neues Kapitel bei der Suche nach weiteren Exoplaneten aufgeschlagen. Vier Kameras werden für jeweils einen Monat auf einen 24 Grad breiten Ausschnitt aus einer Viertelkugel ausgerichtet, so dass im Lauf der Mission rund 80 Prozent des nördlichen und südlichen Sternenhimmels abgedeckt werden. Angefangen hat die Suche nach Exoplaneten bescheidener: 1995 haben die Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz von der Universität Genf unter Nutzung des Dopplereffekts einen Planeten entdeckt, der 50 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt ist und fast die Hälfte der Masse des Jupiter besitzt.<sup>1</sup> Er umkreist seinen Stern namens „51 Pegasi“ in weniger als fünf Tagen auf einer engen Bahn als der Merkur die Sonne. Während sich der Stern und sein Planet, „51 Pegasi b“ genannt, um einen gemeinsamen Schwerpunkt drehen, treten Verschiebungen im Lichtspektrum auf. Diese lassen sich mit Hilfe eines Spektrographen von der Erde aus beobachten.



### Wenn Planeten ihren Stern verdunkeln ...

Um die durchschnittliche Dichte von Exoplaneten zu bestimmen und damit erste Informationen über ihren Aufbau zu gewinnen, muss man zusätzlich zur Masse auch den Radius kennen. Dieser lässt sich mit der Transit-Methode ermitteln: Wenn der Planet zwischen seinem Stern und dem Beobachter tritt, verringert sich die Lichtintensität des Sterns um den Anteil, der vom Planeten verdeckt wird. So gelang es bis 2007, den Radius von fast 30 Exoplaneten zu bestimmen. Dabei handelt es sich überwiegend um „heiße Jupiter“, die ihren jeweiligen Stern in einer Entfernung umrunden, die deutlich kleiner ist als der Abstand der Erde zur Sonne. 2007 startete dann die Europäische Weltraumorganisation ESA ihre Weltraummission CoRoT (*Convection, Rotation and planetary Transits*), die als erste speziell auf die Entdeckung von Exoplaneten ausgerichtet war. 2009 folgte die NASA und transportierte mit dem gleichen Ziel ihr Weltraumteleskop Kepler ins All. Mittlerweile sind von etwa 700 Exoplaneten sowohl die Masse als auch der Radius bekannt; interessanterweise gehört 51 Pegasi b noch nicht dazu. Nach dem Start von

TESS ist mit einem erheblichen Anstieg neuer Entdeckungen zu rechnen, die durch die Transit-Methode möglich werden. Denn jede der vier Kameras ist so ausgerichtet, dass sie einen 16-fach größeren Bereich abdeckt als das Weltraumteleskop Kepler.

### Exotische Vielfalt im All

Die Planeten unserer Sonne können in drei Gruppen eingeteilt werden: Die vier inneren terrestrischen Planeten, die aus Silikatgestein und einem Eisenkern bestehen, die Gasriesen Jupiter und Saturn, die von einer Mischung aus Wasserstoff und Helium dominiert werden, und die Eisriesen Uranus und Neptun, deren äußere Schicht aus einer Mischung aus Wasser, Methan und Ammoniak besteht.

Diese Einordnung ergibt sich aus Beobachtungen, die ihre innere Struktur betreffen, und aus einem Vergleich der dabei gewonnenen Daten mit Ergebnissen, die bei Laboruntersuchungen und Berechnungen infrage kommender Materialien erzielt wurden. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass im Inneren der Planeten der Druck und die Temperatur – und damit die Dichte – wegen der darüber liegenden Materie zunimmt: ein Prozess, der Selbstkompression genannt wird.

Im Unterschied zu unserem Sonnensystem weisen die bisher entdeckten Exoplaneten eine überraschende Vielfalt auf. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Größe und ihrer Masse so sehr, dass sie sich

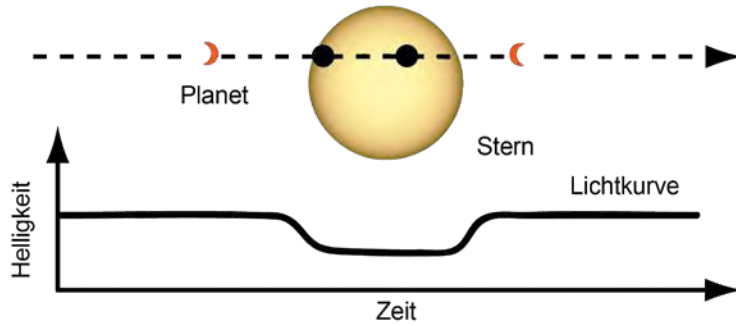


### LINKTIPP

Homepage der Weltraummission TESS:  
<https://tess.gsfc.nasa.gov/>

■ Abb. 1: Das im April 2018 gestartete Weltraumteleskop TESS (Grafik: NASA / wikimedia commons).

■ Abb. 2: Grafische Darstellung des Exoplaneten 51 pegasi b (Grafik: European Southern Observatory (ESO) / M. Kornmesser/Nick Risinger (skysurvey.org) / wikimedia commons / CC-BY-4.0).



■ Abb. 3: Bestimmung der Größe eines Exoplaneten mit Hilfe der zeitlich variierenden Lichtintensität eines Sterns (Transitmethode) (Grafik: NASA, bearb. A. Gaube).

kontinuierlich auf den entsprechenden Mess-Skalen verteilen. Einige haben eine tausendmal geringere Masse als die Erde, andere Exoplaneten übertreffen die Masse des Jupiter bis um das Zehnfache. Bei den einen ist der Radius nur halb so groß wie der Radius der Erde, bei anderen doppelt so groß wie der Radius des Jupiter. Die meisten der zurzeit bekannten Exoplaneten sind größer als die Erde, aber kleiner als Neptun. Auch hinsichtlich der Umlaufbahnen gibt es große Unterschiede: Manche Exoplaneten umrunden ihren Stern in einer Entfernung, die kleiner als ein Prozent des Abstands der Erde von der Sonne ist. Andere halten zu ihrem Stern einen Abstand, der mehr als 20.000 Mal größer ist als der Abstand des Neptun zur Sonne.<sup>2</sup>

Beobachtungen deuten auf sehr exotische Welten hin. So gibt es Planeten wie Kepler-102 d, die nur unwesentlich größer als die Erde sind, aber um ein Vielfaches massiver, als man es von kugelförmigen Himmelskörpern mit Selbstkompression erwarten würde. Diese Planeten scheinen aufgrund der bisherigen Messdaten sogar die Masse eines vollständig aus Eisen bestehenden Körpers zu übertreffen. Dies aber ist – wenn man bisherige Forschungsannahmen über den Zusammenhang von Dichte, Druck und Temperatur zugrunde legt – eine kosmochemische Unmöglichkeit. Daher werden derzeit zwei Erklärungsansätze diskutiert:

- Es handelt sich um eine Fehlinterpretation der Messdaten, die unter anderem auf der Voraussetzung beruht, Kepler-102 b und andere Planeten seien kugelförmig. Diese Planeten könnten jedoch an den Polen abgeflacht sein.<sup>3</sup>
- Wir wissen noch zu wenig über die Dichte von Eisen bei extremen Druck- und Temperaturbedingungen, wie sie im Inneren großer Exoplaneten herrschen. Physikalisch gesprochen: Die Zustandsgleichung, die die Beziehung zwischen Dichte, Druck und Temperatur von Eisen beschreibt, ist nicht ausreichend bestimmt. Dies führt möglicherweise zu verzerrten Massebestimmungen.<sup>4</sup>

Um in dieser Frage Klarheit zu schaffen, ist es erforderlich, mehr über die Dichte von Eisen und anderer Materialien im Inneren von Exoplaneten herauszufinden. Hier ist der Druck um das Drei- bis Vierfache größer als im Mittelpunkt der Erde. Solche Druckverhältnisse lassen sich bisher im Labor nur schwer realisieren. Daher wird die DFG-Forscherguppe „Materie im Inneren von Planeten“ Hochdruckexperimente und Berechnungen an der Universität Bayreuth mit neuen Techniken entwickeln und durchführen, um den zugänglichen Druckbereich deutlich zu erweitern. Dann können kontroverse Beobachtungen von Exoplaneten wie Kepler-102 d in naher Zukunft hoffentlich besser eingeordnet werden.

### Wie sind Exoplaneten aufgebaut?

Für alle chemischen Elemente, Mischungen und Verbindungen lassen sich physikalische Zustandsgleichungen aufstellen, die Dichte, Druck und Temperatur zueinander ins Verhältnis setzen. Die Gleichungen für Silikate und Eisen stimmen gut mit unserem Verständnis vom Aufbau der Erde und der anderen terrestrischen Planeten überein. Doch schon bei den Eisriesen Uranus und Neptun wird es sehr schwierig, ihren Aufbau eindeutig zu bestimmen. Hierbei sind die Zustandsgleichungen für Wasserstoff-Helium-Gemische und für Wasser, aber auch – im Hinblick auf den Kern dieser Planeten – die Zustandsgleichungen für Silikate und Metalle relevant. Zusätzlich zu diesen Gleichungen muss in Betracht gezogen werden, wie dick die verschiedenen Schichten im Inneren der Planeten sind. Noch komplizierter verhält es sich bei Planeten außerhalb des Sonnensystems. Hier sind geophysikalische und kosmochemische Beobachtungen nicht verfügbar,

### AUTOREN



■ Dr. Gerd Steinle-Neumann ist Akademischer Oberrat am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Universität Bayreuth.



■ Florian Trybel M.Sc. ist Doktorand am Bayerischen Geoinstitut.

### Forschung im Verbund

Der Entstehung und dem inneren Aufbau von Exoplaneten widmet sich die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Forschergruppe „Materie im Inneren von Planeten“. Das Bayerische Geoinstitut der Universität Bayreuth ist mit drei Projekten an diesem interdisziplinären Verbund beteiligt. Es kooperiert dabei insbesondere mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) und dem Europäischen Röntgen-Elektronen-Laser (European XFEL) in Hamburg.

## „Im Unterschied zu unserem Sonnensystem weisen die bisher entdeckten Exoplaneten eine überraschende Vielfalt auf.“

wenn man Genaueres über ihren Aufbau erfahren will. Selbst wenn man die Zustandsgleichungen optimiert, bleiben die Planetenmodelle vieldeutig.

Bei der Erforschung der Planeten in unserem Sonnensystem hilft die Messung des Trägheitsmoments, diese Vieldeutigkeit aufzulösen. Das Trägheitsmoment drückt aus, wie sich die Rotation eines Planeten ändert, wenn er von außen – zum Beispiel durch einen Mond – beeinflusst wird. Es hängt davon ab, wie die Masse eines Planeten relativ zu seiner Rotationsachse entfernt ist. Seine Bestimmung lässt daher Rückschlüsse auf die Planetenstruktur zu: Ein Planet mit einem dichten Kern hat ein kleineres Trägheitsmoment als ein Planet, in dem Masse gleichmäßig verteilt ist. In unserem Sonnensystem kann das Trägheitsmoment der Planeten bestimmt werden, indem man die Umlaufbahn eines natürlichen Trabanten (Mond) oder eines Satelliten beobachtet. Außerhalb unseres Sonnensystems sind derartige Beobachtungen noch nicht möglich. Wenn aber mehrere Exoplaneten denselben Stern umrunden, können sich ihre Umlaufbahnen gegenseitig so beeinflussen, dass sie periodische Abweichungen aufweisen. Aus dieser Exzentrizität der Planetenbahnen, die mit Weltraumteleskopen messbar ist, lassen sich Rückschlüsse auf die Trägheitsmomente der Exoplaneten ziehen – in einem Verfahren, das der Dopplermessung von Mayor und Queloz ähnlich ist. Dafür müssen solche Planetensysteme jedoch über längere Zeiträume beobachtet werden, was mit den heutigen Satelliten noch nicht geschieht.

### Nicht immer „rund und schön“

Die nach dem englischen Mathematiker A. E. H. Love (1863–1940) benannte „Love-Zahl  $k_2$ “ beschreibt, wie ein Planet auf das Schwerfeld anderer Himmelskörper reagiert. Sie lässt sich an der ellipsoiden Form des Planeten ablesen, genauer: an der Abflachung seiner Pole. Im Fall der Erde ist der Radius, der vom Erdmittelpunkt bis zu einem der beiden entgegengesetzten Pole reicht, nur um 0,3 Prozent kürzer als der Radius, der sich vom Mittelpunkt des Planeten zum

Äquator erstreckt. Hingegen ist er beim Gasplaneten Saturn fast um 10 Prozent kürzer. Wie stark die Form eines Exoplaneten von einer symmetrischen Kugelform abweicht, lässt sich berechnen. Dazu muss man wissen, wie sich – aus der Perspektive eines Teleskops – die Lichtintensität seines Sterns verändert, während er auf seiner Umlaufbahn vor ihm vorüberzieht. Vor allem, wenn ein ellipsoider Exoplanet auf seiner Umlaufbahn vor die Sternscheibe tritt oder sie verlässt, ändert sich die Lichtintensität anders als bei einem kugelförmigen Planeten.



Angenommen, ein Exoplanet ist so groß wie Jupiter, an den Polen um 10 Prozent abgeflacht und umrundet einen sonnenähnlichen Stern in einer Entfernung, die zehnmal so groß ist wie der Radius dieses Sterns. Dann sagen Modelle Helligkeitsunterschiede voraus, die mit der Messgenauigkeit moderner Teleskope auflösbar sind.

Um eine ausreichende Genauigkeit der Daten zu gewährleisten, sind jedoch wiederholte Messungen nötig. In dieser Hinsicht könnten die früheren Messreihen von Kepler denen von TESS überlegen sein. Denn TESS ist nur einen Monat lang auf das jeweilige Segment des Sternenhimmels ausgerichtet – was möglicherweise zu kurz ist, um valide Messdaten zu erhalten. Die Langzeitmessungen von Kepler, die noch nicht abschließend ausgewertet worden sind, könnten hingegen noch zu überraschenden Einblicken in den Weltraum führen.

■ Abb. 4: Das Weltraumteleskop Kepler der NASA startete 2009 mit dem Ziel, erdähnliche Exoplaneten im Weltall aufzuspüren (Grafik: NASA).

- 1 M. Mayor, D. Queloz: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* (1995), 378, 355-359. DOI: 10.1038/378355a0.
- 2 Vgl. <http://exoplanet.eu/>
- 3 A. C. M. Correia: Transit light curve and inner structure of close-in planets. *Astronomy & Astrophysics* (2014), 570, L5. DOI: 10.1051/0004-6361/201424733.
- 4 K. Hakim, A. Rivoldini, T. Van Hoolst et al.: A new ab initio equation of state of hcp-Fe and its implication on the interior structure and mass-radius relations of rocky super-Earths. *Icarus* (2018), 313, 61-78. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.05.005. – R. F. Smith, D. E. Fratanduono, D. G. Braun et al.: Equation of state of iron under core conditions of large rocky exoplanets. *Nature Astronomy* (2018), 2, 452-458. DOI: 10.1038/s41550-018-0437-9.



■ Abb. 5: Der 63 Lichtjahre von der Erde entfernte Exoplanet HD 189733b (Grafische Darstellung: © ESA - C. Carreau).

■ Werner Köhler

# Neue Einblicke in die Welt der Fluide

Physikalische Grundlagenforschung findet nicht selten unerwartete Anwendungen außerhalb der Physik. Ein Beispiel ist die Thermophorese, die in der Arbeitsgruppe von Prof. Werner Köhler am Physikalischen Institut der Universität Bayreuth intensiv erforscht wird. Es geht dabei um Flüssigkeiten oder Gase mit wärmeren und kälteren Bereichen, also mit Temperaturgradienten. Die Thermophorese bewirkt in solchen Fluiden, dass Moleküle in die eine oder andere Richtung wandern. Für zahlreiche Wissenschaftsgebiete ist vor allem das Verhalten von Fluiden interessant, in denen drei oder mehr Komponenten enthalten sind. Aber leider werden Experimente im Labor infolge der Schwerkraft häufig gestört.

Hier setzt das multinationale Forschungsprogramm DCMIX an, das die europäische Weltraumorganisation ESA und die russische Weltraumorganisation ROSCOSMOS initiiert haben. Im Rahmen dieses Programms finden auf der Internationalen Raumstation ISS Messungen an Flüssigkeitskombinationen statt, die sich aus mindestens drei Komponenten zusammensetzen und als Modellsysteme ausgewählt wurden. Dabei kommt ein spezielles optisches Verfahren, die Laser-Interferometrie, zum Einsatz: Mit verschiedenen Wellenlängen des Lichts werden die Flüssigkeitskonzentrationen in einer Messzelle, die einen Temperaturgradienten aufweist, abgetastet. Die Messergebnisse bieten wichtige Ergänzungen zu umfangreichen Forschungsarbeiten auf der Erde. Sie fungieren als Referenzdaten, die es ermöglichen, störende Einflüsse der Gravitation aus den am Boden erzielten Messdaten herauszurechnen.

Seit das DCMIX-Programm im Jahr 2011 startete, ist das Forschungsteam um Prof. Werner Köhler wesentlich daran beteiligt. Eine 2014 gestartete Versuchsserie (DCMIX-3) haben die Bayreuther Wissenschaftler federführend koordiniert, und auch an den derzeit laufenden Experimenten (DCMIX-4) wirken sie maßgeblich mit. Die Bayreuther Forschungsarbeiten werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gefördert. Die Ergebnisse können die interdisziplinäre Forschung hinsichtlich der grundlegenden Frage, wie das Verhalten von Molekülen durch Temperatur, Druck und Schwerkraft beeinflusst wird, weiter voranbringen. Möglicherweise erweisen sie sich auch im Hinblick auf die frühe

Evolution des Lebens als aufschlussreich. Darüber hinaus haben sie das Potenzial, technologisch interessante Entwicklungen zu fördern – beispielsweise neue Funktionsmaterialien aus Kunststoff, solare Wärmespeicher, Mikromaschinen für die Biomedizin oder die Erstarrung von Metall-Legierungen.

Neuerdings wird die Thermophorese in den Lebenswissenschaften angewendet, wenn es um die Erforschung von Proteinen als Bausteinen des Lebens geht. Hierzu zählen auch die meisten Enzyme. Dies sind komplexe Moleküle, die lebenswichtige Stoffwechselprozesse in Gang setzen und beschleunigen. Von großem Interesse ist daher die Frage, wie sehr Proteine dazu neigen, untereinander oder mit anderen Molekülen Bindungen einzugehen. Genau dies kann mittels Thermophorese untersucht werden.

AUTOR



■ Prof. Dr. Werner Köhler ist Professor für Experimentalphysik an der Universität Bayreuth.





# Energiequellen für die Raumfahrt

Wie können Satelliten, die entlegene Regionen des Sonnensystems erkunden sollen, ausreichend mit Energie versorgt werden? Die üblichen Solarzellen sind dazu nicht in der Lage, weil in den Tiefen des Weltalls nicht ausreichend Sonnenlicht zur Verfügung steht. Die US-amerikanische Raumfahrtbehörde NASA hat sich daher gezwungen gesehen, Satelliten mit thermonuklearen Reaktoren auszurüsten, die ein seltenes und teures Isotop des radioaktiven Materials Plutonium verwenden. Die Kernspaltung an Bord ist allerdings teuer und technologisch schwer umzusetzen. Zudem ist das benötigte Plutonium-Isotop nur sehr eingeschränkt verfügbar. Aber gibt es Alternativen zu Plutonium-basierten Reaktoren, die sich für die Energieversorgung auf NASA-Weltraummissionen eignen? Der Bayreuther Physiker Prof. Axel Enders und sein Team an der University

of Nebraska-Lincoln in den USA haben sich auf die Suche begeben – und hatten Erfolg. Die von ihnen entwickelte Idee zur Lösung des Problems kommt aus der Physik der Nanostrukturen: Neue, im Labor hergestellte Halbleiter aus den Elementen Bor und Kohlenstoff sind imstande, Neutronen effizient zu absorbieren und dabei elektrischen Strom zu erzeugen.

Eine entscheidende Herausforderung bestand allerdings darin, das Metall Bor auf molekularer Ebene so zu modifizieren, dass es sich – ähnlich wie Silizium – wie ein Halbleiter verhält. Genau dies ist den Forschern gelungen. Mit dem von ihnen synthetisierten Halbleiter-Material lassen sich voltaische Elemente herstellen, die aus Neutronen elektrischen Strom erzeugen und dabei leistungsfähiger sind als herkömmliche Solarzellen, die elektrischen Strom aus Licht gewinnen.

Ein wichtiger Projektabschnitt begann im Jahr 2016, als Proben des Materials für ein halbes Jahr in der Internationalen Raumstation ISS installiert wurden. Während dieser Zeit waren sie den von der Sonne kontinuierlich ausgesendeten Neutronen ausgesetzt. Nach ihrer Rückkehr zur Erde wurden sie in Bayreuth und Lincoln exakt vermessen. Als besonders aufschlussreich erwies sich der Vergleich mit einem Satz identischer Proben, der während des gleichen Zeitraums im Labor verblieben war. Die Ergebnisse haben dazu beigetragen, dass sich die Eignung des neu entwickelten Materials für die Raumfahrt jetzt viel genauer einschätzen lässt. Sie bieten außerdem überraschende Einblicke in die Energieverteilung der Sonnen-Neutronen, die bisher nur unvollständig erforscht ist.

Die gemeinsamen Fortschritte bei der Herstellung des neuen Halbleiters „by design“ helfen den Forschern nun dabei, eine Vielzahl weiterer Anwendungen auf den Weg zu bringen. Es sind beispielsweise ultradünne Beschichtungen an Raumsonden denkbar, welche die an Bord befindlichen Personen und Geräte vor Neutronen schützen und dabei gleichzeitig Energie produzieren. Auch auf der Erde ist das Material aller Voraussicht nach von Nutzen. Derzeit werden auf diesem Halbleiter basierende Pixel-Detektoren getestet, die es auf Flughäfen oder in Containerumschlagplätzen ermöglichen, illegal eingeführte radioaktive Substanzen schnell zu erkennen.

## AUTOR



■ Prof. Dr. Axel Enders ist Inhaber eines Lehrstuhls für Experimentalphysik an der Universität Bayreuth.

■ Die Internationale Raumstation ISS, von der Raumfähre Discovery aus gesehen (Foto: NASA).



■ Miriam Knie  
Christian Laforsch

# Nahrungs- produktion im Weltall

Experimente aus Bayreuth  
in der Schwerelosigkeit

■ Großer Wasserfloh (*Daphnia magna*). Das abgebildete erwachsene Tier ist vom Kopf bis zur Schwanzstachelspitze etwa vier bis fünf Millimeter lang. Wasserflöhe dieser Spezies sind in Europa, im Norden und im Süden Afrikas, in Asien, Nordamerika und Südafrika verbreitet (Mikroskopische Aufnahme: Max Rabus).



Die für die nahe Zukunft geplante Erkundung des Weltraums wird die Menschen weiter von unserem Planeten wegführen als je zuvor. Bemannte Flüge ins Weltall, beispielsweise zum Mars, werden somit viel länger dauern als die früheren Apollo-Missionen zum Mond. Für die Zukunft der Raumfahrt ist es daher eine Schlüsselfrage, wie die Astronauten über mehrere Wochen oder Monate hinweg mit lebensnotwendigen Gütern wie Nahrung, Wasser und Sauerstoff versorgt werden können. Der Transport großer Proviantmengen an Bord benötigt zu viel Energie, und von der Erde aus können nur Raumfahrzeuge im erdnahen Orbit – zum Beispiel die Internationale Raumstation (ISS) – versorgt werden. Ein Ausweg könnte die ständige Produktion von Nahrung direkt an Bord sein. Hierfür kommen bioregenerative Lebenserhaltungssysteme infrage, die überdies dazu beitragen, die Atemluft in der Raumfähre mit Sauerstoff anzureichern und Trinkwasser für die Astronauten aufzubereiten.

### Wasserflöhe – geeignete Kandidaten für die Erzeugung von Proviant an Bord?

Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme (*Bioregenerative Life Support Systems, BLSS*) sind künstliche Ökosysteme. Sie setzen sich aus Organismen zusammen, die unterschiedlichen Stufen in der Nahrungskette angehören und gemeinsam ein geschlossenes Nahrungsnetz bilden. Ein wichtiger Organismus ist in diesem Zusammenhang der Wasserfloh *Daphnia*, der zum Zooplankton zählt. Zooplankton besteht aus kleinen Organismen, die in den Nahrungsnetzen von Seen und Meeren ein wichtiges Bindeglied darstellen: Einerseits ernähren sie sich von Mikroalgen, andererseits stellen sie nährstoffreiches Futter für Fische oder für andere im Wasser lebende Tiere dar. Den größten Anteil am Zooplankton bilden winzige Krebstiere, wie beispielsweise die Daphnien. Wegen der von ihnen erzeugten Biomasse sind sie in aquatischen Systemen von großer ökologischer Bedeutung. Aus demselben Grund sind sie – jedenfalls auf den ersten Blick – attraktive Kandidaten für bioregenerative Lebenserhaltungssysteme, die im Weltall Proviant für die Astronauten erzeugen.

Bevor Wasserflöhe und andere Zooplankton-Organismen an Bord von Raumfahrzeugen für die Nahrungsproduktion eingesetzt werden können, muss aber zunächst geklärt werden, wie sie sich unter Weltraumbedingungen verhalten. Dabei spielen molekulare Untersuchungen eine wichtige Rolle, denn es konnte bereits in Zellkulturexperimenten

und bei Untersuchungen von Pflanzen gezeigt werden, dass Schwerelosigkeit die Genexpression verändert. Für künftige Weltraum-Missionen ist daher die Frage entscheidend, ob auch bei einem Wegfall der Schwerkraft eine stabile Biomasseproduktion in bioregenerativen Lebenserhaltungssystemen aufrechterhalten werden kann. Um Zooplankton-Organismen unter diesem Aspekt zu testen, nutzt die Forschung verschiedene technische Plattformen. Die Dauer der erzeugten Schwerelosigkeit reicht dabei von wenigen Sekunden in Falltürmen und Parabelflügen bis hin zu mehreren Minuten in Höhenforschungsraketen und Suborbitalflügen.

### Fallturm Bremen

In Falltürmen wird ein schwerelosere Zustand in einer druckdichten Fallkapsel erzeugt, die im Vakuum fallen gelassen wird. Der Fallturm Bremen ist mit einer Gesamthöhe von 146 Metern der höchste in Europa. Er beherbergt in seinem Inneren eine 120 Meter hohe stählerne Fallröhre, eine Abbremskammer und ein Katapultsystem. So kann der Fallturm auf zwei verschiedene Arten betrieben werden: Im *drop mode* wird die Kapsel mit einer Seilwinde bis an das obere Ende der Fallröhre transportiert und von dort fallen gelassen. So wird eine Schwerelosigkeitsphase von etwa 4,7 Sekunden erzielt. Im *catapult mode* hingegen wird die Kapsel in einer vertikalen Parabel in die Höhe geschossen, so dass eine doppelt so lange Schwerelosigkeitsphase entsteht.

Um die Eignung von Zooplankton für bioregenerative Lebenserhaltungssysteme im Weltall zu untersuchen, haben Bayreuther Wissenschaftler verschiedene Experimente am Fallturm in Bremen durchgeführt. Dabei haben sie insbesondere das

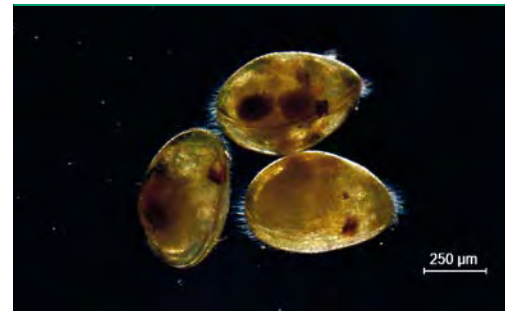


■ Abb. 1: Der Fallturm Bremen des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) an der Universität Bremen (Foto: Miriam Knie).

■ Abb. 2 (rechts oben): Muschelkrebse (*Heterocypris incongruens*) (Bild: Miriam Knie).

■ Abb. 3 (rechts unten): Ruderfußkrebse (*Daiptomus* sp.) (Bild: Miriam Knie).

Schwimmverhalten und die Nahrungsaufnahme von Daphnien untersucht. Der Fallturm dient darüber hinaus der Vorbereitung von Experimenten in der Schwerelosigkeit, die in Raumfahrzeugen während bemannter oder unbemannter Flüge durchgeführt werden sollen. Forschungsgeräte lassen sich im Fallturm sehr kostengünstig daraufhin testen, ob sie auch in der Schwerelosigkeit problemlos funktionieren. Diese Möglichkeit haben die Bayreuther Forscher genutzt, um eine Anlage zu optimieren, mit der die Genexpression in Daphnien während eines Suborbitalflugs von Blue Origin untersucht werden soll.



## „Daphnien sind attraktive Kandidaten für bioregenerative Lebenserhaltungssysteme, die im Weltall Proviant für die Astronauten erzeugen.“

### Parabelflüge

Wenn ein Flugzeug exakt einer ballistischen Flugbahn folgt, spricht man von einem Parabelflug. Zunächst wird das Flugzeug horizontal auf seine Höchstgeschwindigkeit beschleunigt, dann beginnt ein Steigflug mit einem Neigungswinkel von 47 Grad. Währenddessen wirkt ungefähr die doppelte Erdbeschleunigung auf die Insassen des Flugzeugs ein. Sobald eine ausreichende Aufwärtsgeschwindigkeit erreicht ist, verringern die Piloten den Schub, kompensieren den Luftwiderstand, und das Flugzeug beginnt bergauf zu „fallen“. Jetzt entsteht die Schwerelosigkeit. Wenn das Flugzeug den Scheitelpunkt der Parabel überschritten hat, fliegt es der Erdoberfläche entgegen. Am Ende der Parabel ziehen die Piloten das Flugzeug wieder auf eine horizontale Bahn, wobei erneut die doppelte Erdbeschleunigung erreicht wird.

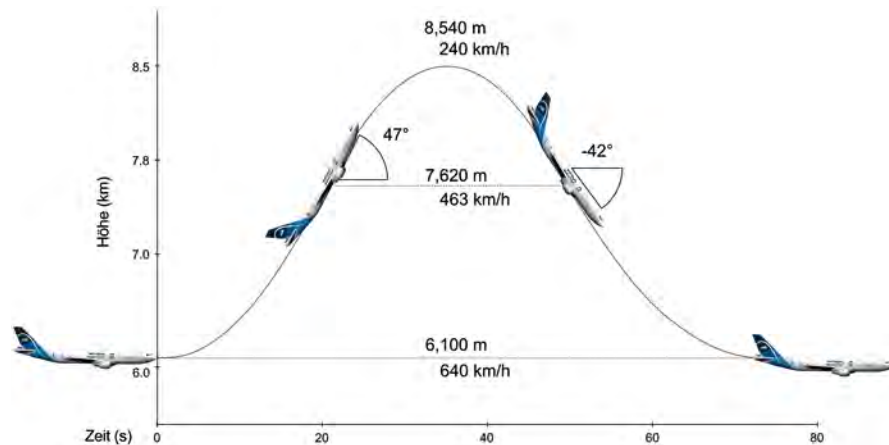
Die Europäische Weltraumorganisation ESA verwendet für Parabelflüge einen umgerüsteten Airbus A310 (ZERO-G). Die dabei erzeugte Schwerelosigkeit dauert 22 Sekunden. Darüber hinaus können mit der ZERO-G auch modifizierte Parabeln geflogen werden, welche die Schwerkraftverhältnisse auf dem Mond oder dem Mars widerspiegeln. Experimente unter diesen Verhältnissen eignen sich besonders gut dafür, die Sensitivität der Schwerkraftwahrnehmung in verschiedenen Zooplankton-Organismen zu messen und zu vergleichen. Die gewonnenen Daten enthalten wichtige Hinweise für die Auswahl von Organismen, die sich für bioregenerative Lebenserhaltungssysteme im Weltraum eignen.

Die Experimente mit Daphnien waren darauf ausgerichtet, die Mechanismen der Schwerkraftwahrnehmung besser zu verstehen. Dabei ging es auch um die Frage, wie sich das Zusammenspiel von Licht und Schwerkraft auf die Orientierung der Tiere auswirkt. Weil bioregenerative Lebenserhaltungssysteme an Stabilität gewinnen können, wenn verschiedene Zooplankton-Organismen darin zum Einsatz kommen, haben die Bayreuther Forscher neben den Daphnien auch Muschelkrebse (Ostrakoden) und Ruderfußkrebse (Copepoden) in die Experimente einbezogen. Bei den Muschelkrebsen wurde auch die Nahrungsaufnahme in der Schwerelosigkeit untersucht, da sie – ebenso wie Daphnien – eine beliebte Beute von Fischen darstellen und deshalb besonders interessante Kandidaten für bioregenerative Lebenserhaltungssysteme sind.



■ Abb. 4: Airbus A310 (ZERO-G), der von der Europäischen Weltraumorganisation ESA für Parabelflüge verwendet wird (Foto: AG Christian Laforsch).

■ Abb. 5: Schema eines Parabelflugs (Grafik: Novespace).

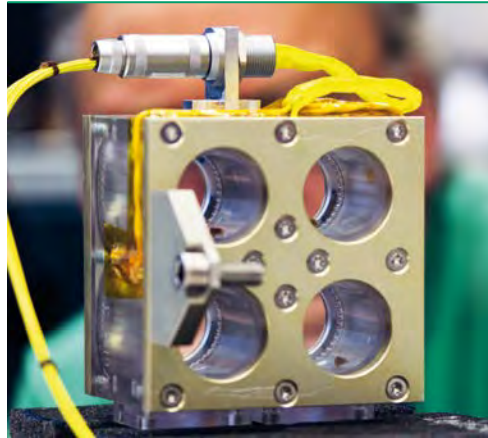


## Höhenforschungsraketen

Höhenforschungsraketen (*sounding rockets*) sind unbemannte Forschungsraketen, die eine Höhe von 50 bis 1.500 Kilometer erreichen können. Ursprünglich wurden sie hauptsächlich zur Atmosphärenforschung eingesetzt. Sie können nämlich in genau diejenigen Bereiche vordringen, die oberhalb der Reichweite von Wetterballons liegen, aber zu niedrig für den Einsatz von Satelliten sind. Heute sind sie ein wichtiges Instrument zur Durchführung von Experimenten in der Schwerelosigkeit, die während dieser Flüge für mehrere Minuten erzeugt werden kann.

Das deutsche Höhenforschungsprogramm TEXUS (Technologische Experimente unter Schwerelosigkeit) wurde bereits 1976 als Vorbereitung für die erste Spacelab-Mission im Jahr 1983 gegründet. Es wird seit 1976 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und seit 2006 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über das DLR-Raumfahrtmanagement gefördert. Die Raketen starten im europäischen Raumfahrtzentrum ESRANGE in der Nähe von Kiruna in Nordschweden. Mit einem zweistufigen Feststoffmotor erreichen sie eine Höhe von etwa 250 Kilometer. Die dabei erreichte Phase der Schwerelosigkeit ist mit sechs Minuten deutlich länger als bei Parabelflügen und Fallturmexperimenten. Daher sind die TEXUS-Raketen eine ideale Plattform, um die Anpassungsstrategien verschiedener Zooplankton-Organismen an die Schwerelosigkeit zu untersuchen. Während eines Fluges können die Versuche vom Boden aus durch Telecommanding und Videoübertragung gesteuert und überwacht werden. Im Rahmen von Experimen-

ten, die das Bayreuther Forschungsteam vorbereitet hatte, wurde das Schwimmverhalten von Daphnien und Ostrakoden während des Fluges aufgezeichnet. Zudem wurden an den Daphnien auch molekulare Untersuchungen vorgenommen, um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie die Schwerelosigkeit die Genexpression beeinflusst.



■ Abb. 6: Hardware für das Bayreuther Räuber-Beute-Experiment im Rahmen von TEXUS (Foto: Miriam Knie).

Damit bioregenerative Lebenserhaltungssysteme auch im Weltall funktionieren, darf der Energietransfer innerhalb der Nahrungskette nicht durch die Schwerelosigkeit beeinträchtigt werden. Dies ist nur dann gewährleistet, wenn die Organismen auf den verschiedenen Stufen der Nahrungskette – den sogenannten „trophischen Ebenen“ – unverändert so miteinander wechselwirken, wie sie es auf der Erdoberfläche tun. Daher haben die Bayreuther Forscher im Rahmen von TEXUS auch ein Räuber-Beute-Experiment durchgeführt. Hierbei wurde die kleine Daphnienart *Daphnia cucullata* als Beute für zwei verschiedene Räuber, den „Urzeitkreb“ *Triops cancriformis* und die Larve der Büschelmücke *Chaoborus*, eingesetzt.

## Suborbitalflüge mit Blue Origin

Diese Vielfalt an Plattformen für Forschungsarbeiten in der Schwerelosigkeit könnte in Zukunft noch durch Fluggeräte bereichert werden, die private Firmen für orbitale und suborbitale Flüge entwickeln. Die Unternehmen wollen am stark aufstrebenden Markt des Weltraumtourismus teilnehmen, aber auch die Möglichkeit nutzen, Flüge für wissenschaftliche oder technische Zwecke kommerziell anzubieten – beispielsweise für die Forschung unter Weltraumbedingungen oder für die Beförderung von kleinen Satelliten. Entscheidend hierfür sind die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Fluggeräte.



■ Abb. 7: Start einer TEXUS-Höhenforschungsrakete im europäischen Raumfahrtzentrum ESRANGE (Foto: Miriam Knie).

## AUTOREN



■ Dr. Miriam Knie ist Postdoc am Lehrstuhl Tierökologie I an der Universität Bayreuth.



■ Prof. Dr. Christian Laforsch ist Inhaber des Lehrstuhls Tierökologie I an der Universität Bayreuth.

■ Abb. 8 (links oben): Das Bayreuther Team bei der Vorbereitung der Experimente vor dem Start von New Shepard (Foto: Blue Origin).

■ Abb. 9 (rechts oben): Zwei Forscherteams aus Deutschland vor der Kapsel von New Shepard, in der Experimente unter Schwerelosigkeit stattfinden: J. Siemer, M. Heseding und Dr. T. Könemann von der ZARM Fallturm-Betriebsgesellschaft mbH in Bremen sowie Prof. Dr. C. Laforsch und Dr. M. Knie von der Universität Bayreuth (von li.) (Foto: Blue Origin).



LITERATURTIPPS

M. Knie, B. Wolfschoon Ribeiro, J. Fischer et al.: Approaches to assess the suitability of zooplankton for bioregenerative life support systems, in: T. Russomano, L. Rehnberg (eds.): Into space – a journey of how humans adapt and live in microgravity. London 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74261.

J. Fischer, K. Schoppmann, C. Laforsch: Life history responses and feeding behavior of microcrustacea in altered gravity – applicability in bioregenerative life support systems (BLSS). Microgravity Science and Technology (2017), 29 (3), 241-249. DOI: 10.1007/s12217-017-9545-x.

J. Fischer, C. Laforsch: The influence of gravity and light on locomotion and orientation of *Heterocypris incongruens* and *Notodromas monacha* (Crustacea, Ostracoda). npj Microgravity (2018), 4 (1). DOI: 10.1038/s41526-017-0037-5.

Deshalb werden zunächst unbemannte Testflüge durchgeführt. Diese Tests sind eine ideale Gelegenheit, die neuen kommerziellen Fluggelegenheiten frühzeitig und kosteneffektiv auf ihre Eignung für wissenschaftliche Zwecke zu prüfen.

Einer der Anbieter in diesem Bereich ist das US-amerikanische Unternehmen Blue Origin. Es hat das Fluggerät *New Shepard* entwickelt, das sich derzeit in der Phase der unbemannten Testflüge befindet. Die dabei erzielte Schwerelosigkeit hat eine Dauer von drei Minuten. An Bord eines solchen Testflugs – eines *scientific pathfinder flight* – fanden Ende April 2018 erstmals biologische Experimente statt. In einem dieser Tests, den ein Team unter der Leitung von Prof. Dr. Christian Laforsch an der Universität Bayreuth konzipiert hatte, wurde der Einfluss von Schwerelosigkeit auf die Genexpression und das Zytoskelett im Wasserfloh *Daphnia magna* untersucht. Ein wesentlicher Unterschied zu den TEXUS-Missionen, bei denen es sich ebenfalls um Suborbitalflüge handelt, ist die Beschleunigung nach dem Start. Sie erreicht bei *New Shepard* deutlich geringere Geschwindigkeiten, weil dieses Fluggerät von vornherein für bemannte Flüge konzipiert wurde.



■ Abb. 10: Die Hardware der Bayreuther Experimente nach dem Blue Origin-Flug (Foto: T. Könemann).

Fazit

Jede der hier vorgestellten Plattformen leistet für sich genommen einen wichtigen Beitrag dazu, das Verhalten von Zooplankton-Organismen in der Schwerelosigkeit zu testen. Aber nur durch eine Kombination der unterschiedlichen Ansätze gewinnt man ein umfassendes Verständnis dafür, wie die Organismen mit dem Wegfall der Schwerkraft umgehen und welche physiologischen und genetischen Mechanismen dem zugrunde liegen. Diese Erkenntnisse bilden eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung komplexer Lebenserhaltungssysteme, die in der Lage sind, an Bord der Fluggeräte den Proviant für bemannte Weltraummissionen zu erzeugen. Zugleich können diese Forschungsarbeiten zu grundlegenden Einblicken in die Evolutionsgeschichte führen: Sie werden vermutlich darüber Aufschluss geben, wie sich die Schwerkraftwahrnehmung in Plankton entwickelt hat. Vor allem aber sollen die Experimente im Weltraum Anhaltspunkte dafür liefern, inwiefern Zooplankton-Organismen auch auf der Erde für eine nachhaltige Nahrungsversorgung genutzt werden können.

■ Abb. 11: Das Team der Universität Bayreuth und weitere Forscher aus Deutschland und den USA mit Jeff Bezos (Mitte vorn) und seinem Team von Blue Origin an der „West Texas Launch Site“. Im Hintergrund das gelandete Propulsion Module von New Shepard (Foto: Blue Origin).



■ Birte Höcker

# Der Entstehung des Lebens auf der Spur

Seit ihrem Ursprung vor etwa 3,7 Milliarden Jahren sind Proteine die Schlüsselemente des Lebens. Sie übernehmen im Organismus aller Lebewesen eine fast unüberschaubare Vielzahl lebenswichtiger Funktionen, zum Beispiel bei Stoffwechselfvorgängen, Muskelbewegungen, Immunreaktionen oder der Fortpflanzung. Alle Proteine bestehen aus miteinander verknüpften Aminosäuren und falten sich in die unterschiedlichsten dreidimensionalen Strukturen. Wie haben sich diese Strukturen im Verlauf der Evolution herausgebildet? Diese Frage steht im Zentrum eines neuen, von der VolkswagenStiftung geförderten Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Biochemie der Universität Bayreuth. Die Bayreuther Wissenschaftler kooperieren dabei mit dem Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen und drei israelischen Partnern: dem Weizmann-Institut in Rehovot sowie der Universität Haifa und der Universität Tel Aviv.

## Archäologie der Proteine

Es ist ein Grundprinzip der Evolution, dass zur Entwicklung neuer Proteine bereits vorhandene Bausteine wiederverwendet werden. Bei diesen Bausteinen handelt es sich um Proteinsegmente, die in existierenden Proteinen bestimmte Funktionen erfüllen. Sie werden mit denselben oder veränderten Strukturen in neue Proteine eingebaut. Hier übernehmen sie, in Kombination mit weiteren Proteinsegmenten, möglicherweise ganz neue und vorher unbekannte Funktionen. Diejenigen Proteinsegmente, die in den Organismen von Pflanzen, Tieren und Menschen eine besonders prominente Rolle spielen, heißen Domänen. Es gibt sie in sehr unterschiedlichen Zu-

sammensetzungen und Faltungsstrukturen, in den meisten Fällen enthalten sie zwischen 100 und 200 Aminosäuren.

Ein Forschungsteam in Bayreuth und Tübingen hat nun die faszinierende Entdeckung gemacht, dass Domänen in Proteinen heute lebender Organismen Hinweise darauf enthalten, wie sie in früheren Stadien der Evolution verwendet wurden. Diese Indizien sollen in dem deutsch-israelischen Verbundprojekt systematisch aufgespürt und ausgewertet werden. Computersimulationen auf leistungsstarken Rechnern, die mögliche Szenarien der Proteinentwicklung rekonstruieren und vergleichen können, werden dabei ein unentbehrliches Instrument der Forschung sein. Das Ziel ist es, auf diese Weise den Mechanismen auf die Spur zu kommen, welche die Herausbildung neuer Proteine – und damit die Entstehung neuer Funktionalitäten – gesteuert und vorangetrieben haben. Die biochemische Forschung wird so zur Archäologie des Lebens.

## Werkstatt für die Zukunft

Aber es geht nicht nur um den Blick zurück ins Laboratorium der Evolution, sondern auch um Chancen für die Zukunft. Wenn man weiß, wie das Prinzip der Neuverwertung zu neuen komplexen Proteinfunktionen geführt hat, lassen sich diese Erkenntnisse auf das gezielte Design funktionaler Proteine und Proteinsysteme anwenden. Diese biotechnologischen Innovationen können beispielsweise der Biomedizin oder der Landwirtschaft zugute kommen und eines Tages das Leben auf unserem Planeten Erde verbessern helfen.

## AUTORIN



■ Prof. Dr. Birte Höcker ist Professorin für Biochemie an der Universität Bayreuth. Hier koordiniert sie eine Arbeitsgruppe im neuen deutsch-israelischen Verbundprojekt zur Protein-Evolution. Für ein weiteres, damit verwandtes Vorhaben zur Proteinforschung wurde sie vom Europäischen Forschungsrat mit einem ERC Consolidator Grant ausgezeichnet (Foto: Jörg Abendroth).

■ Zukunftsorientiert und international vernetzt: der Campus der Universität Bayreuth (Foto: Lili Nahapetian).



## Im Licht der Freiheit

„Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei“, heißt es klar und prägnant in Artikel 5, Absatz 3 des Grundgesetzes. Die Skulptur „you are free“ des Aschaffener Künstlers Robert Kessler will dieses Grundrecht im Spannungsfeld gegensätzlicher Kräfte sichtbar und erlebbar machen. Im September 2017 wurde das interaktive Kunstwerk auf dem Campus der Universität Bayreuth vor dem Gebäude Naturwissenschaften III installiert.

Schon von weitem sichtbar ist der polierte Irisspiegel mit einem Durchmesser von dreieinhalb Metern. In seiner Mitte befindet sich ein symbolisches Auge: Der hier einfallende Lichtstrahl

der Sonne erleuchtet einmal im Jahr, zur Erinnerung an die Verkündung des Grundgesetzes im Jahre 1949, vollständig eine in den Boden eingelassene Scheibe. Gegenüber dem Irisspiegel befindet sich ein kleiner, um 360 Grad drehbarer Makulaspiegel. Sobald er berührt und bewegt wird, wechselt die Beleuchtung ihre Farbe; wenn man ihn loslässt, kehrt er von selbst in die Ausgangsposition zurück. Mit ihren überraschenden optischen und kinetischen Effekten will die Edelstahl-Skulptur den Betrachter anregen, sich mit dem Thema „Freiheit“ aktiv auseinanderzusetzen und sich dadurch der eigenen standpunktabhängigen Sichtweisen bewusst zu werden.

