

AUSGABE 9  
DEZEMBER 2016

RUPERTO CAROLA  
FORSCHUNGSMAGAZIN



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386




# LIEBE LESERINNEN UND LESER DER RUPERTO CAROLA,

**STOP & GO** – zwei Zustände, die unsere Erlebenswelt alltäglich prägen und bestimmen. Sie kennzeichnen in grundlegender Weise die Dynamik des Lebens, nicht nur auf Ebene der subjektiven Wahrnehmung, sondern auch auf Ebene ganz elementarer biologischer Prozesse. Darüber hinaus beeinflusst der stetige Wechsel zwischen Stillstand und Bewegung unsere Umwelt, ist Merkmal gesamtgesellschaftlicher Prozesse oder findet sich auch in historischen Kontexten wieder.

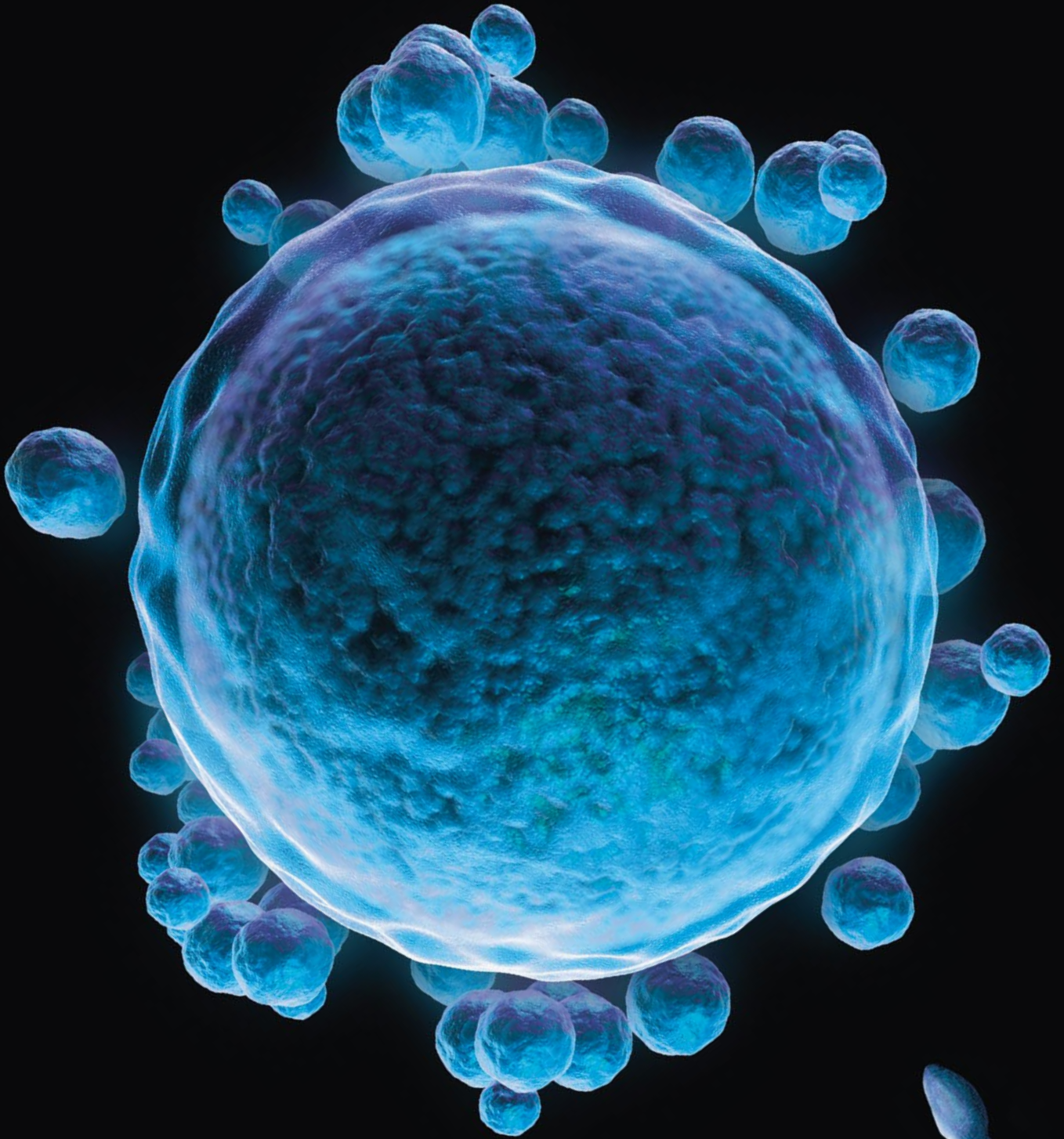
Die Facetten von „Stop & Go“ werden in der aktuellen Ausgabe unseres Forschungsmagazins von Autorinnen und Autoren verschiedener Disziplinen ausgeleuchtet. Sie geben mit ihren aktuellen Forschungsarbeiten Einblicke in die Medizinische Psychologie, die Quantenphysik, die Neurobiologie, aber auch in die Geschichtswissenschaften, die Gerontologie und die Bildungswissenschaften. Ihre Beiträge befassen sich mit den Grundlagen der Gedächtnisbildung ebenso wie mit Stressfaktoren im Arbeitsumfeld oder dem Werden und Vergehen von Sprachen.

Die neue Ausgabe unseres Forschungsmagazins zeigt erneut, wie spannend Forschung für die Akteure – Wissenschaftler und Studierende –, aber auch für alle Interessierten sein kann.

Ich wünsche Ihnen anregende neue Erkenntnisse und vor allem viel Freude bei der Lektüre der RUPERTO CAROLA.



**Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Eitel**  
Rektor der Universität Heidelberg



WEITSPRUNG



EXPERTEN IM GESPRÄCH  
**DIE DYNAMIK DES LEBENS  
KÖRPER UND GEIST**  
IM GESPRÄCH MIT KATJA MOMBAUR & JOACHIM FUNKE

**6**

QUANTENPHYSIK  
**AUS DEM GLEICHGEWICHT  
STILLSTAND & DYNAMIK**  
THOMAS GASENZER

**16**

NEUERE GESCHICHTE  
**IM DAZWISCHEN**  
TRANSITERFAHRUNGEN IN EINER VERNETZTEN WELT  
ROLAND WENZLHUEMER

**24**

ARBEITS- UND ORGANISATIONSPSYCHOLOGIE  
**ARBEIT 4.0**  
ENTGRENZTES LEBEN  
KARLHEINZ SONNTAG

**32**

VORSPRUNG



PARASITOLOGIE  
**RUHE VOR DEM STURM**  
NEUE ANSÄTZE IM KAMPF GEGEN MALARIA  
FRIEDRICH FRISCHKNECHT

**42**

UMWELTPHYSIK  
**GIFTIG**  
LUFTVERSCHMUTZUNG IN DEN STÄDTEN  
DENIS PÖHLER & ULRICH PLATT

**50**

PHYSIKALISCHE CHEMIE  
**VORHANG AUF – VORHANG ZU**  
DAS SCHAUSPIEL DER MOLEKÜLE  
MARCUS MOTZKUS

**60**

MATHEMATIK  
**FREIE BAHN**  
KOMPLEXITÄT BEHERRSCHEN  
EKATERINA KOSTINA

**68**

HOCHSPRUNG

SUCHTFORSCHUNG  
**IMMER WIEDER AUFHÖREN  
WEGE AUS DER SUCHT**  
FALK KIEFER

**78**

NEUROWISSENSCHAFTEN  
**LERNEN UND VERGESSEN  
VON FLIEGEN UND MENSCHEN**  
CHRISTOPH SCHUSTER

**86**

MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE  
**KEIN HALTEN MEHR  
WENN STRESS KRANK MACHT**  
BEATE DITZEN & MARTIN STOFFEL

**94**

PHARMAKOLOGIE  
**ÜBERREIZTE NERVEN  
EIN MOLEKÜL BREMST DEN SCHMERZ AUS**  
JAN SIEMENS

**102**

IMPRESSUM

**109**

SCHLUSSSPRUNG

LITERATURGESCHICHTE  
**POETISCHE SCHATZKAMMERN  
TRADITION ALS MOTOR**  
DIRK WERLE

**112**

SPRACHWISSENSCHAFT  
**GEBURT, TOD UND AUFERSTEHUNG  
VOM LEBENSZYKLUS DER SPRACHEN**  
WERNER ARNOLD & GERRIT KLOSS

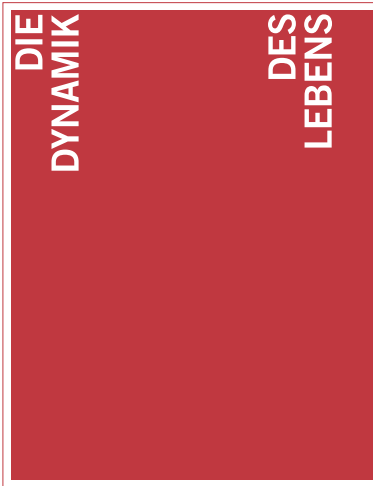
**120**

URTEILS- UND ENTSCHEIDUNGSFORSCHUNG  
**JA, NEIN, VIELLEICHT?  
ZWISCHEN DEN STÜHLEN**  
SILKE HERTEL, INGRID SCHOBERTH & GERHARD DANNECKER

**130**

GERONTOLOGIE  
**WIE LANGE NOCH?  
AM ENDE DES LEBENS**  
ANDREAS KRUSE

**138**



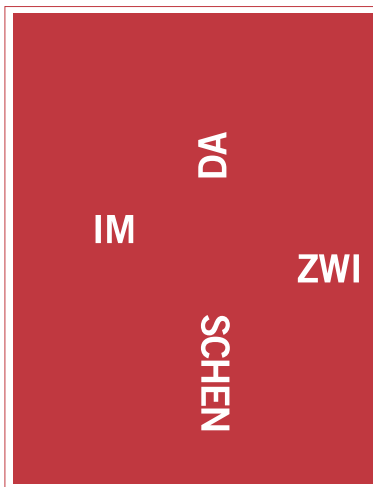
EXPERTEN IM GESPRÄCH  
**DIE DYNAMIK DES LEBENS**  
KÖRPER UND GEIST  
IM GESPRÄCH MIT KATJA MOMBAUR & JOACHIM FUNKE

**6**



QUANTENPHYSIK  
**AUS DEM GLEICHGEWICHT**  
STILLSTAND & DYNAMIK  
THOMAS GASENZER

**16**



NEUERE GESCHICHTE  
**IM DAZWISCHEN**  
TRANSITERFAHRUNGEN IN EINER VERNETZTEN WELT  
ROLAND WENZLHUEMER

**24**



ARBEITS- UND ORGANISATIONSPSYCHOLOGIE  
**ARBEIT 4.0**  
ENTGRENZTES LEBEN  
KARLHEINZ SONNTAG

**32**

# WEITSPRUNG



**DIE  
DYNAMIK**

**DES  
LEBENS**



DIE DYNAMIK DES LEBENS

# KÖRPER UND GEIST

IM GESPRÄCH MIT KATJA MOMBAUR &amp; JOACHIM FUNKE

Höher, weiter, schneller, mehr! Leben ist gekennzeichnet durch das ständige Streben nach Weiterentwicklung und Wachstum. Was aber, wenn es zum Stopp kommt – wenn der Körper aufgrund von Krankheit oder dem Alterungsprozess zum Stillstand gezwungen ist; wenn die Psyche kapituliert, weil die Reize und Eindrücke, die tagtäglich auf uns einprasseln, überfordern und blockieren? „Stop & Go“ gehören zu den zentralen Aspekten unserer Erfahrungswelt, sie beeinflussen unsere Umwelt, sind Teil gesamtgesellschaftlicher Prozesse und Kern grundlegender naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeiten. Über die Dynamiken von „Stop & Go“ mit Blick auf die vielfältigen Aspekte unseres Lebens sprechen die Robotik-Expertin Katja Mombaur und der Psychologe Joachim Funke.

# W

Was verbinden Sie vor dem Hintergrund Ihrer jeweiligen Disziplin mit dem Begriffspaar „Stop & Go“?

**Funke:** Die Psychologie ist eine Lebenswissenschaft – und Leben heißt Dynamik, Leben heißt Wechsel zwischen verschiedenen Zuständen und damit auch zwischen den Extremen von „Stop & Go“, Stillstand und Bewegung. Das zeigt sich schon an unserem Tagesablauf: dem stetigen Wechsel zwischen Wach- und Schlafphasen. „Stop & Go“ im Sinne einer Dynamik als Merkmal lebendiger Systeme – diese Thematik berührt ein Herzstück meines Faches.

**Mombaur:** In der Robotik und Biomechanik denken wir bei „Stop & Go“ zunächst an Bewegungen. Jede Bewegung – ob die eines Menschen, eines Tieres oder die eines Roboters – ist gekennzeichnet durch Phasen des Beschleunigens, also Go-Phasen, und Phasen des Stoppens. Bewegungen, bei denen sich der Körper in konstanter Geschwindigkeit befindet, gibt es hingegen kaum. Im Sport etwa macht man sich diesen Wechsel zwischen Beschleunigung und Stoppen ganz gezielt zunutze, beispielsweise um möglichst hoch springen oder möglichst weit werfen zu können. Die Stop-&-Go-Phasen der einzelnen Körperteile werden dabei sehr genau aufeinander abgestimmt.

Auch bei Interaktionsproblemen spielt die Dynamik unserer Bewegungen – das Abbremsen und Beschleunigen – eine wichtige Rolle. Damit es in Menschenmassen oder bei der Begegnung zweier Menschen nicht zu Zusammenstößen kommt, muss einer der Interaktionspartner ausweichen. Das kann durch den Wechsel der Bewegungsrichtung erfolgen, ebenso durch Bremsen oder Beschleunigen. Ähnliche Mechanismen greifen in Situationen, in denen unser Bewegungsablauf gestört wird und wir zu Ausfallbewegungen gezwungen sind, etwa bei einem Ausfallschritt, um einen Sturz zu verhindern.

Mit welcher Intention untersuchen Sie menschliche Bewegungen?

**Mombaur:** Gesunde Bewegungsabläufe und die damit verbundenen Kraftanstrengungen und Regelmechanismen zu kennen ist unbedingte Voraussetzung, um gestörte Bewegungen verstehen zu können – etwa wenn es aufgrund einer Krankheit oder aufgrund von Alterungsprozessen zu Einschränkungen kommt. Meine Arbeitsgruppe forscht

# „Jede Bewegung – ob die eines Menschen, eines Tieres oder die eines Roboters – ist gekennzeichnet durch Phasen des Beschleunigens und Phasen des Stoppens.“



Professor Katja Mombaur

intensiv an der Entwicklung physikalischer Assistenz-Systeme, insbesondere dem Bau von Exoskeletten, die dazu dienen, Menschen, die sich nicht mehr alleine bewegen können oder deren Bewegungen gestört sind, wieder zur Mobilität, zum „Go“ zu verhelfen. Exoskelette kann man sich als eine Art Roboter zum Anziehen vorstellen. Es gibt sie für verschiedene Teile des Körpers, etwa für die unteren Extremitäten. Derzeit entwickeln wir ein Exoskelett für die Wirbelsäule, das den ganzen Rücken unterstützen soll. Ziel unserer Arbeit ist es dabei, den Betroffenen zum einen im physikalischen Sinne zu helfen, sie beweglicher zu machen, darüber hinaus hat unsere Forschung aber auch noch folgenden Aspekt: Exoskelette und andere Assistenzroboter fördern die Unabhängigkeit und Eigenständigkeit – beispielsweise können sie alten Menschen ermöglichen, länger im vertrauten Zuhause zu wohnen.

„Stop“ in diesem Sinne bedeutet Stillstand und ist negativ konnotiert, „Go“ steht für Fortbewegung, wieder ins Leben treten, vorwärtskommen. Kann ein „Stop“ auch positiv sein – und ein „Go“ negativ?

**Funke:** Beide Begriffe beinhalten sowohl positive als auch negative Aspekte. Ein Stopp etwa kann auch bedeuten, innezuhalten – den Wechsel vom Modus der Aktion in den Modus der Ruhe. Nicht umsonst gibt es das Sprichwort: „Erst denken, dann handeln“. Dahinter steckt die Idee, dass wir Stopp-Phasen brauchen, um „gut“ agieren zu können. Im Ruhezustand also entwickeln wir einen Handlungsplan, um ihn in der Aktionsphase in die Tat

umzusetzen. „Stop“ und „Go“ sehe ich dementsprechend als inhärente Teile eines Ganzen: Der Wechsel zwischen beiden Zuständen ist eine wichtige Voraussetzung für all unsere Erfahrungen. Ein einfaches Beispiel hierfür sind unsere Augen. Wenn ich starr auf einen Punkt blicke, dann bleicht die Netzhaut aus und das ursprünglich scharfe Bild verschwimmt. Nur durch Bewegung kann ich dauerhaft Schärfe und Objektpermanenz herstellen.

Das Innehalten, die Hinwendung zum Inneren, ist wichtiger Bestandteil vieler Therapiekonzepte in der Psychologie. In den letzten Jahren ist hierfür das Schlagwort der Achtsamkeit populär geworden. Eine achtsame Haltung einzunehmen bedeutet, aus unserem üblichen Tun-Modus auszusteigen und in den Modus des Seins zu wechseln, die Konzentration auf die eigene Wahrnehmung zu richten und das Hier und Jetzt zu spüren.

#### Inwieweit kann uns Achtsamkeit helfen?

**Funke:** Wir leben in einer Welt, die uns permanent mit Reizen überflutet, in einem Zustand des ständigen „Go’s“. Wir sind keine Stillstände mehr gewohnt, jeder Stopp löst Unruhe aus. Kaum dass eine Wartesituation eintritt, ziehen wir reflexhaft unser Handy hervor. Dieser ständige Aktionismus birgt die Gefahr, dass wir in unserem Tun-Modus versinken und uns selbst verlieren. Achtsamkeit bringt uns in die Gegenwart und zu uns selbst zurück. Achtsamkeit lässt sich in diesem Sinne auch als Gegenregulation der ständigen Überstimulation begreifen: Wir nehmen die Kontrolle wieder in die Hand und steuern unsere Wahrnehmung. Ein Instrument hierfür kann der eigene Atem sein. Indem ich spüre, wie ich ein- und ausatme, komme ich zu mir selbst, kann entspannen und gewinne Gelassenheit. Ich merke, dass ich meinen Atem unter Kontrolle habe, die Atmung beschleunigen und verlangsamen kann – ich erfahre „Agency“. Agency meint, dass wir uns als Agenten und damit handlungsfähig und selbstwirksam wahrnehmen.

#### Die Wiederherstellung von Handlungsfähigkeit und Selbstwirksamkeit – ein Aspekt, auf den auch Exoskelette abzielen. Wie gehen Sie bei Ihrer Arbeit vor, Frau Prof. Mombaur?

**Mombaur:** Bewegungen zeichnen sich durch zwei wesentliche Komponenten aus: zum einen durch die Mechanik, also das Skelett, die Gelenke und die Muskulatur, und zum anderen durch kognitive Vorgänge. Letztere werden dann wichtig, wenn eine Situation an Komplexität gewinnt. Läuft ein Mensch auf ebenem Untergrund, regeln simple mechanische Gesetze die Stabilität des natürlich fließenden Bewegungsablaufs. Das menschliche Gehen besteht aus einem stetigen Zyklus kontrollierten Schwingens und Fallens. Beim Treppensteigen hingegen oder etwa beim Balancieren auf einem Balken kommen kognitive Prozesse stärker zum Tragen. Der Mensch muss seine Umgebung



Professor Joachim Funke

„Leben heißt Dynamik,  
Leben heißt  
Wechsel zwischen  
verschiedenen  
Zuständen und damit  
auch zwischen  
den Extremen von  
,Stop & Go‘.“

wahrnehmen, mögliche Gefahren einschätzen und genau berechnen, wohin er seine Füße setzt.

Unser Ansatz ist es, die Physik und die mechanischen Komponenten, die hinter den Bewegungsabläufen stecken, zu ergreifen, sie in mathematische Gleichungen zu fassen, um diese dann wiederum zu simulieren und unter verschiedenen Bedingungen zu optimieren. Kernstück unserer Arbeit ist also die Entwicklung effizienter Algorithmen – sowohl auf der Modellierungsseite als auch auf der Simulations- und Optimierungsseite. Dies allerdings kann nur auf der Grundlage eines umfassenden Verständnisses der Systeme gelingen, an denen wir arbeiten – in unserem Fall den natürlichen Bewegungsabläufen des Menschen, die sich im gesunden Zustand durch eine hohe Stabilität und Effizienz auszeichnen.

Die mechanischen Gesetzmäßigkeiten von Bewegungen sind dabei der kontrollierbare Teil des Systems. Was unsere Arbeit aber letztlich so spannend und anspruchsvoll macht, ist die Komponente Mensch, das schwer vorher-sagbare Verhalten des Einzelnen, das wir einkalkulieren müssen. Nehmen wir zum Beispiel ein Assistenzsystem, das einen Patienten unterstützen soll, dessen Knie geschädigt sind: Diesem System müssen wir unsere Erwartung an das Verhalten des Betroffenen einprogrammieren, etwa, inwieweit er versuchen wird, seine Knie zu schonen. Das Assistenzsystem liefert dann im Idealfall genau jenes Drehmoment, das der Patient selber vermeidet. Dabei soll es aber auch nicht überregulieren, also solche Bewegungen, die selbstständig erfolgen können, vorwegnehmen. Jedes Assistenzsystem muss individuell an seinen Benutzer angepasst werden. Schwierig ist das vor allem bei Pathologien, die sehr variable Bewegungsabläufe hervorrufen, beispielsweise bei Multipler Sklerose. Bewegungen, die der Patient heute problemlos ausführen kann, können morgen völlig undenkbar sein. Die Forschung steht hier erst am Anfang.

**Funke:** Exoskelette haben für mich immer auch die Konnotation militärischer Anwendung. Wie stellt ihr sicher, dass eure Anwendungen nicht für andere Zwecke missbraucht werden?

**Mombaur:** Ja, Exoskelette werden auch im militärischen Bereich eingesetzt, etwa um die natürlichen Kräfte des Menschen zu verstärken. Unsere Berechnungen zielen allerdings ganz klar auf einen medizinischen Einsatz ab. Das ist ethisch unbedenklich und zudem sehr viel interessanter und anspruchsvoller – eben weil es sich hier um gestörte und damit weniger leicht vorhersagbare Bewegungsabläufe handelt. Unter anderem entwickeln wir einen Rollator auf der Basis von Roboter-Technologie, der für militärische Zwecke ganz sicher völlig uninteressant ist. Einen endgültigen Schutz davor, dass unsere Arbeiten



**PROF. DR. KATJA MOMBAUR** hat Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart und in Toulouse studiert und wurde im Jahr 2001 im Fach Mathematik promoviert. Ihre wissenschaftliche Laufbahn führte sie unter anderem an die Seoul National University und das LAAS-CNRS in Toulouse. Seit 2010 ist sie Professorin am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg. Dort leitet sie die Arbeitsgruppe „Optimierung in Robotik und Biomechanik“ sowie das Robotiklabor. Die Schwerpunkte ihrer Arbeit sind die Modellierung, Simulation und Optimierung von anthropomorphen Systemen, also von Menschen, humanoiden Robotern und virtuellen Charakteren.

Kontakt: [katja.mombaur@iwr.uni-heidelberg.de](mailto:katja.mombaur@iwr.uni-heidelberg.de)

missbraucht werden, gibt es jedoch nicht. Dies ist ein generelles Problem in der Wissenschaft.

**Funke:** Diese Erfahrung mussten wir in der Psychologie vor einigen Jahren leider auch machen, als der Skandal um die Entwicklung der sogenannten Weißen Folter aufgedeckt wurde. Unter diesem Begriff werden all jene Formen von Folter zusammengefasst, die zwar keine körperlichen Spuren hinterlassen, dafür aber erhebliche psychische Folgen. Für die Entwicklung solcher Foltermethoden wurden Erkenntnisse aus Forschungsarbeiten genutzt, die von führenden Vertretern der Amerikanischen Psychologischen Gesellschaft für Hunderte Millionen Dollar auf Basis unseres akademischen Lehrwissens durchgeführt worden waren.

Halten Sie es vor diesem Hintergrund für richtig, bestimmte Arten der Forschung aus ethischen Gründen zu stoppen?

**Funke:** Es ist illusorisch, zu glauben, dass sich Forschung stoppen ließe. Aber wir können und müssen ein höheres Bewusstsein für missbräuchliche Anwendungen von Forschung schaffen, beispielsweise indem wir Stellungnahmen herausgeben, die deutlich machen, für welche Zwecke unsere Arbeiten intendiert sind – und indem wir missbräuchliche Anwendungen von Erkenntnissen nicht verschweigen, sondern uns öffentlich mit diesen Fällen auseinandersetzen.

**Mombaur:** Es liegt in der Natur der Wissenschaft, dass Forscher ihre Ergebnisse veröffentlichen. Damit kann ein Missbrauch letztlich leider nie ausgeschlossen werden. Dennoch: Wissenschaftlicher und technischer Fortschritt lässt sich nicht aufhalten – und er sollte auch gar nicht aufgehalten werden. Ich halte es für wesentlich, an diesem Fortschritt mitzuwirken und ihn in die richtige Richtung zu lenken.

Frau Prof. Mombaur, Sie sagten, dass Sie die mechanische Seite der Bewegung modellieren. Ist es auch möglich, kognitive Prozesse mathematisch zu erfassen?

**Mombaur:** Ja, auch kognitive Prozesse lassen sich in Algorithmen abbilden. Joachim Funke und ich betreuen seit einiger Zeit gemeinsam eine Promotion, in der es um die Erzeugung von Kunst aus einer dynamischen Bewegung heraus im Stil von Jackson Pollock geht, also einer Form von „action art“. Hierfür haben wir einen Roboter entwickelt, den „Jackson-Bot“, der mit zufällig generierten dynamischen Bewegungen Farbe auf eine Leinwand spritzt. Anschließend haben wir in psycho-physischen Studien verglichen, was genau die physikalischen Eigenschaften dieser Bilder sind – etwa in Bezug auf Kontraste, Linienvläufe oder Farben – und wie diese Bilder auf Probanden wirken. Ziel ist es, den Roboter so zu programmieren, dass er basierend auf den Ergebnissen der psycho-physischen Studien selbst entscheiden kann, welche Art Bild er malt und wie dieses auf den Betrachter wirken soll.

# DEAR READERS OF RUPERTO CAROLA,

STOP & GO – two states of being that shape and determine our experience every day. They are characteristic of the dynamics of life, not just in our subjective perception, but also on the level of elementary biological processes. Moreover, the constant change between standstill and motion influences our environment; it is a feature of societal processes and historical events alike.

The various facets of ‘Stop & Go’ are illustrated in the latest edition of our research magazine by authors from a number of disciplines. With their current research, they give us an insight into medical psychology, quantum physics and neurobiology, as well as history, gerontology and education studies. Their articles deal with such topics as the principles of memory formation, sources of stress in our work environment and the birth and death of languages.

The new edition of our research magazine shows once again how exciting research can be for those involved – scientists and students – but also for anyone else with an interest in pushing back the boundaries of knowledge. I wish you many new and inspiring insights and, most of all, an enjoyable reading experience with RUPERTO CAROLA.

Prof. Dr Dr h. c. Bernhard Eitel  
President of Heidelberg University

# „Wir können und müssen ein höheres Bewusstsein für den Missbrauch von Forschung schaffen.“

Joachim Funke

Ein kreativer Roboter also. Herr Prof. Funke, inwiefern sind die Dynamiken von „Stop & Go“ für kreative Prozesse relevant?

**Funke:** Kreativität ist ohne diese Dynamiken nicht vorstellbar. Der Wechsel von Kontexten, der Wechsel von Umgebungen ist äußerst wichtig, um neue Impulse zu erhalten. Monotonie hingegen ist der Tod jeder Kreativität. Allerdings brauchen kreative Prozesse auch Muße. Wenn Leistungs- oder Erwartungsdruck zu hoch sind, kann dies die Kreativität ebenso hemmen wie Monotonie. Durch Fremdsteuerung sind schöpferische Leistungen letztlich kaum zu erzwingen. Andererseits sind viele neue Ideen in Zeiten entstanden, die durch Mangel gekennzeichnet waren, etwa im Krieg. „Not macht erfinderisch“, heißt es zurecht. In Zeiten des Überflusses hingegen tendieren wir dazu, uns zurückzulehnen: Wir sind saturiert. Letztlich erfordert Kreativität immer auch ein gehöriges Maß an Selbststeuerung und Disziplin.

Kann ein Computer tatsächlich kreativ sein?

**Mombaur:** Jackson-Bot in seiner ersten Version war zunächst nur ein erweitertes Werkzeug, das die Eingaben des Programmierers ausgeführt hat. Die Folgeversion des Roboters, an der wir derzeit arbeiten, soll selbstlernend und selbsterkennend sein und damit auch eine gewisse kreative Komponente enthalten. Die eigentlichen kreativen Prozesse finden allerdings hinter der Kulisse statt, also bei der Entwicklung und Programmierung: Jeder Algorithmus erfordert einen kreativen Entstehungsprozess.

**Funke:** Ich halte Kreativität für eine genuin menschliche Kategorie, genauso wie Emotionen. Eine Maschine kann Zufallsmuster produzieren, die kreativ wirken, eine Maschine kann auch Emotionen zeigen oder auf Emotionen reagieren – dies aber immer nur insoweit, als es ihr von ihrem Erbauer einprogrammiert wurde.

In der Science-Fiction wird das Bild humanoider Roboter transportiert, die uns ebenbürtig, gar überlegen sind. Wie realistisch ist diese Vision?

**Mombaur:** Hiervon sind wir noch meilenweit entfernt. Ja, es gibt bereits Roboter, die in bestimmten Bereichen geradezu genial sind und uns übertreffen – beispielsweise im Schach. Dabei handelt es sich aber um sehr fokussierte Fähigkeiten. Gerade auf dem Gebiet der Motorik ist es noch ein weiter Weg, bis Roboter natürliche menschliche Bewegungsabläufe nachahmen können.

Interessant ist, dass mit der Fiktion humanoider Roboter häufig Ängste und Skepsis transportiert werden. Ziel ihrer Entwicklung ist es aber nicht, uns Menschen in irgendeiner Weise zu ersetzen oder überflüssig zu machen, sondern Roboter beispielsweise dort einzusetzen, wo es für den Menschen zu gefährlich ist – um Bomben zu entschärfen etwa oder für Tätigkeiten in Hochrisikobereichen wie bei Katastrophensituationen in Atomkraftwerken.



**PROF. DR. JOACHIM FUNKE** leitet seit 1997 die Arbeitseinheit „Allgemeine und Theoretische Psychologie“ am Psychologischen Institut der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Psychologie, Philosophie und Germanistik wurde er 1984 in Trier promoviert. 1991 habilitierte er sich an der Universität Bonn. Joachim Funke forschte und lehrte unter anderem als Gastprofessor an der Universität Fribourg in der Schweiz, der Melbourne University in Australien und der Nanjing University, China. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören Prozesse wie das Denken, das Problemlösen und die Kreativität. Von 2009 bis 2014 war er Chairman der internationalen Expertengruppe zum Thema „Problem Solving“ für die weltweiten PISA-Studien der OECD.

Kontakt: [joachim.funke@psychologie.uni-heidelberg.de](mailto:joachim.funke@psychologie.uni-heidelberg.de)

THE DYNAMICS OF LIFE

# BODY AND MIND

INTERVIEW WITH KATJA MOMBAUR &amp; JOACHIM FUNKE

Higher, further, faster, more! Life is characterised by the permanent striving for development and growth. But what if there is a stop – if the body is forced to come to a standstill due to illness or ageing, if the mind capitulates under the daily onslaught of stimuli and impressions that overwhelm and block us? ‘Stop & Go’ are among the most central aspects of our experience; they influence our surroundings, are part of major social processes and form the core of fundamental scientific laws. We talked with robotics expert Katja Mombaur and psychologist Joachim Funke about the dynamics of ‘Stop & Go’ and how they affect different aspects of our lives.

“Life is dynamic; it is a constant change between different states, including the extreme poles of ‘Stop & Go’”, explains Joachim Funke. The psychologist points out that in life, stopping and simply being is just as important as doing and being active – particularly in a world that continually floods our senses with stimuli, forcing us into a permanent state of ‘Go’.

Katja Mombaur, on the other hand, deals with purely physical movement. Her work group at the University’s Interdisciplinary Center for Scientific Computing develops exoskeletons – wearable robots, as the researcher explains, that help people who cannot move on their own or whose movement is impaired to become mobile and ‘Go’ once more. “The goal of our work is to develop a definition of stability. None of the various mathematical approaches developed to date is able to generate really stable human movements.” ●

PROF. DR KATJA MOMBAUR studied aerospace engineering at the University of Stuttgart and in Toulouse and earned her PhD in mathematics in 2001. Among other places, her scientific career led her to Seoul National University and the LAAS-CNRS in Toulouse. In 2010 she became a professor at the Interdisciplinary Center for Scientific Computing of Heidelberg University. She heads the work group 'Optimization in Robotics and Biomechanics' and the robotics lab. The focal areas of her work include modelling, simulation and optimisation of anthropomorphic systems, i.e. of humans, humanoid robots and virtual characters.

Contact: katja.mombaur@iwr.uni-heidelberg.de

PROF. DR JOACHIM FUNKE has been heading the research unit 'Experimental and Theoretical Psychology' at Heidelberg University's Institute of Psychology since 1997. He studied psychology, philosophy and German studies and obtained his PhD from the University of Trier in 1984. In 1991 he completed his habilitation at the University of Bonn. He went on to teach and do research as a visiting professor at the Universities of Fribourg (Switzerland), Melbourne (Australia) and Nanjing (China). Prof. Funke's research interests include processes like thinking, problem solving and creativity. From 2009 to 2014 he was chairman of the international group of experts on problem solving for the global PISA studies of the OECD.

Contact: joachim.funke@psychologie.uni-heidelberg.de

**“Life is dynamic; it is a constant change between different states, including the extreme poles of ‘Stop & Go’.”**

Joachim Funke

**“What makes the development of exoskeletons so exciting is the human factor – the behaviour of individuals, which is very hard to predict.”**

Katja Mombaur



Roboter haben auch eine unterstützende Funktion, so können sie zum Beispiel älteren Menschen im Haushalt helfen. Jeder technische Fortschritt führt zu Veränderungen und damit immer auch zu Unsicherheiten. Mir geht es darum, den Fortschritt positiv zu gestalten.

Wie sieht die Zukunft der Robotik und Biomechanik hier in Heidelberg aus? Was sind die zentralen Fragen?

**Mombaur:** Wir stehen kurz vor der Gründung eines interdisziplinären Forschungszentrums zum Thema Bewegungen, des sogenannten Heidelberg Center for Motion Research. Gerade erst haben wir hierfür die Zusage einer Förderung durch die Carl-Zeiss-Stiftung erhalten. Das neue Zentrum wird uns mit Kollegen aus vielen anderen Fakultäten vernetzen, unter anderem mit Psychologen und Psychiatern, mit Theologen, mit Neurowissenschaftlern sowie mit Geriatern und Sportwissenschaftlern. Im Zuge der Antragstellung haben wir über fünfzig verschiedene Ideen für Gemeinschaftsprojekte in unterschiedlichen Konstellationen skizziert. Während sich unsere bisherigen Bewegungsstudien vorrangig auf Fragestellungen aus dem orthopädischen Bereich, dem Sport und auf alltägliche Bewegungen beziehen, wollen wir in Zukunft beispielsweise auch untersuchen, wie Tanzbewegungen funktionieren oder wie sich verschiedene psychische Krankheitsbilder auf Bewegungen auswirken – und was sich wiederum aus der Bewegung über diese Krankheiten ablesen lässt. Außerdem wollen wir zum Transfer der Forschung in die Gesellschaft beitragen.

Herr Prof. Funke, welche Themen werden die bestimmen in Ihrer Forschung sein?

**Funke:** Was für Katja Mombaur die Frage nach der Stabilität des Körpers ist, ist in meiner Disziplin die Frage nach der Stabilität der Psyche. Warum entgleiten manche Menschen aus einem gesunden psychischen Zustand in eine Psychose oder eine Depression? Warum schaffen manche es, zurück zu einer stabilen psychischen Verfassung zu finden, während andere für immer in ihrer Krankheit gefangen bleiben? Und – ähnlich der Frage nach der Definition von Stabilität – was ist eigentlich eine gesunde Psyche? Wie können wir diese angesichts der fließenden Übergänge zwischen gesund und krank allumfassend definieren?

Mich treibt aber noch eine andere Fragestellung an, die in direktem Bezug zu unserem Schwerpunktthema steht. Die Psychologie hat sich lange mit statischen Situationen beschäftigt: Man hat Menschen in experimentelle Settings gebracht, beispielsweise um ihr Entscheidungsverhalten unter Bedingungen zu untersuchen, die man im Labor genau bestimmen konnte. Ich halte dies für einen völlig ungeeigneten Zugang. Der Prozess der Entscheidungsfindung ist ein dynamischer Vorgang und keiner, der sich in dem isolierten Umfeld eines experimentellen Settings

„Mit der Fiktion  
humanoider Roboter  
werden häufig  
Ängste und Skepsis  
transportiert.  
Mir geht es darum,  
den Fortschritt  
positiv zu gestalten.“

Katja Mombaur

nachstellen lässt. Mein Anliegen ist es, diese Dynamik zu beschreiben und besser zu verstehen. Dabei hat sowohl die Situation selbst ihre eigene Dynamik als auch die individuelle menschliche Entscheidungsstruktur.

Es geht also um die Entwicklung einer neuen Methodik?

**Funke:** Genau, die herkömmliche experimentelle Methodik, auf die die Psychologie seit 120 Jahren setzt, stößt hier an ihre Grenzen. Die Komplexität alltäglicher Situationen lässt sich nicht so einfach experimentell zerlegen. Meine Arbeitsgruppe arbeitet beispielsweise mit Computersimulationen, um dynamische Welten besser nachstellen zu können. In diesem Bereich liegt noch viel Entwicklungspotenzial – insbesondere in der Zusammenarbeit mit Mathematikern und Programmierern. ●

Das Interview führten Marietta Fuhrmann-Koch & Ute von Figura

**AUS DEM**

**GLEICHGEWICHT**

AUS DEM GLEICHGEWICHT

# STILLSTAND & DYNAMIK

THOMAS GASENZER

**Der Zustand des Gleichgewichts wirkt beruhigend auf unser Gemüt. Was aber wäre das Gleichgewicht ohne Bewegung? Die Natur „lebt“ geradezu dadurch, dass sie aus dem Gleichgewicht gerät und sich wieder in es zurückbewegt. Der ständige Wechsel von „Stop“ und „Go“ lässt fragen, wie sich Gleichgewichtszustände überhaupt einstellen. Oder gibt es vielleicht sogar Bedingungen, unter denen der Zustand des Gleichgewichts nicht zu erreichen ist? Diese vordergründig unscheinbaren Fragen eröffnen Einblicke in bislang unbekannte Phänomene von weitreichender praktischer Bedeutung.**

# D

Der Gedanke an den Urlaub lässt die Menschen ins Schwärmen geraten. Die einen träumen von sich unendlich weit erstreckenden Bergseen, in deren Oberfläche sich die Gipfel spiegeln, andere denken an das unvermeidliche Stop-and-Go auf der Brenner-Route gen Süden. Gleichgewicht herrscht hier wie dort – aller vordergründigen hektischen Dynamik zum Trotz erfahren wir den Zustand des Gleichgewichts als übermächtiges Charaktermerkmal der Natur: An jedem Ort, an jedem Objekt, an jedem Atom greifen Kräfte an, die sich gegenseitig ausgleichen.

Das wirkt beruhigend auf unser Gemüt. Was aber wäre das Gleichgewicht ohne die Bewegung? Die Natur „lebt“ ja erst durch das Überwinden des Gleichgewichts, unser biologisches Leben wäre sonst kaum möglich. „Stop & Go“ – Der ständige Wechsel führt uns zu der interessanten, nur vordergründig unscheinbaren Frage, wie sich Gleichgewichtszustände überhaupt einstellen können – und ob

dies tatsächlich in jedem Fall passiert. Darauf wollen wir mit unseren Arbeiten in der Forschungsgruppe „Synthetic Quantum Systems“ am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg eine Antwort finden.

## Was passiert auf dem Weg ins Gleichgewicht?

Schon lange vor uns wollten Naturforscher wissen, was die innere Dynamik und das Gleichgewicht eines gasförmigen Stoffes oder einer Flüssigkeit ausmacht. Was genau passiert zum Beispiel im Kessel oder im Kondensator einer Dampfmaschine? Bis heute ist vieles noch immer nicht verstanden und geheimnisvoll – vor allem dort, wo die Quantenphysik im Spiel ist. Denn beim Nicht-Gleichgewicht haben es Experimentatoren schwer: Die Elektronendynamik in Materialien etwa ist extrem schnell und daher nur schwer zu messen; auch die Dynamik nach dem Urknall oder die Dynamik in einem Neutronenstern lässt sich im Labor nicht so leicht nachstellen.

Extrem kalte Atomgase hingegen erlauben es heute, Modellsysteme gezielt im Nicht-Gleichgewicht zu realisieren. An ihnen lassen sich präzise Messungen durchführen, deren Ergebnisse helfen können, auch andere physikalische Systeme zu verstehen. Die Atomgase ermöglichen es beispielsweise, Aspekte der Elektronendynamik magnetischer Materialien oder der Physik des frühen Universums zu simulieren.

Ein Alltagsbeispiel mag veranschaulichen, um welche Fragen es dabei grundsätzlich geht: Sobald wir eine frische



**PROF. DR. THOMAS GASENZER** leitet eine Theorie-Forschungsgruppe am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg im Rahmen der Experiment-Theorie-Arbeitsgruppe „Synthetic Quantum Systems“ (SynQS). Bis zum Jahr 2014 war er am Institut für Theoretische Physik der Universität tätig, ab 2006 mit einem Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Forschungsaufenthalte führten ihn nach Oxford, Großbritannien, und Boulder, Colorado. Er koordiniert das Netzwerk „Analog Quantum Simulators for Many-Body Dynamics“ (AQus) in dem von der EU finanzierten Programm Horizon 2020 „Future and Emerging Technologies“ mit Partnern in Berlin, Cambridge, Heidelberg, München, Paris, Trient und Wien. Darüber hinaus ist er Projektleiter im Sonderforschungsbereich 1225 „Isolated Quantum Systems and Universality in Extreme Conditions“ (ISOQUANT). Seit 2016 wirkt er als Geschäftsführer des Heidelberger Zentrums für Quantendynamik (CQD).

Kontakt: [t.gasenzer@uni-heidelberg.de](mailto:t.gasenzer@uni-heidelberg.de)

Tasse Kaffee aus der Thermoskanne oder aus dem Automaten befreit haben, gerät das Getränk aus dem Gleichgewicht und beginnt abzukühlen. Was aber geschieht dabei genau? Die „Atomisten“, allen voran der Physiker Ludwig Boltzmann, verstanden bereits im 19. Jahrhundert die Wärme eines Körpers als Maß der mikroskopischen Bewegungen kleinster Teilchen. Die innere Dynamik der Gase und Flüssigkeiten rührt von den Zusammenstößen unzähliger Atome oder Moleküle her. Dadurch ändern die einzelnen Teilchen beständig ihre Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit. Der Kaffee kühlt ab, wenn sich diese Bewegung beruhigt.

Um diesen Prozess zu verstehen, müssen wir uns die Eigenschaften des Gleichgewichts noch etwas genauer ansehen: Im Gleichgewicht ist die mittlere Bewegungsenergie und damit die Geschwindigkeit der Wassermoleküle proportional zur Temperatur (dass die Temperatur innerhalb der Tasse leicht variieren kann, vernachlässigen wir hier). Nicht jedes Molekül aber hat die exakt gleiche Energie. Vielmehr findet sich eine Verteilung verschiedener Geschwindigkeiten – und damit von Energien –, und deren mittlere Abweichung von der mittleren Energie ist ebenfalls proportional zur Temperatur.

Im Zustand des Gleichgewichts folgt die Anzahl der Teilchen mit verschiedenen möglichen Energien in guter Näherung einem einfachen mathematischen Zusammenhang. Dieses nach Ludwig Boltzmann und dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell benannte Verteilungsgesetz legt nicht die Geschwindigkeiten aller einzelnen Teilchen fest. Stattdessen gibt das Gesetz an, wie wahrscheinlich es ist, dass ein einzelnes Teilchen eine bestimmte Geschwindigkeit hat. Der dadurch beschriebene Gleichgewichtszustand ist allein durch die Temperatur des Systems festgelegt.

Zurück zum frisch eingeschenken Kaffee: Damit er schneller abkühlt, greifen wir gerne zum Löffel, stellen ihn aber nicht einfach nur in die Tasse hinein, sondern rühren mit ihm die heiße Flüssigkeit an die Oberfläche. Dort verdampfen zuerst die schnellsten Wassermoleküle, die die höchste Bewegungsenergie haben. Genau genommen verstärkt das Umrühren mit dem Löffel das Maß, in welchem der Kaffee aus dem inneren thermischen Gleichgewicht gerät – mit dem angenehmen Nebeneffekt, dass die flüchtigen Aromate die Raumluft veredeln.

Worin äußert sich das Nicht-Gleichgewicht im Kaffee? Sobald aus der Oberfläche übermäßig viele schnelle Moleküle verdunstet sind, ist das „Maxwell-Boltzmann-Verteilungsgesetz“ gestört. Es sind jetzt verhältnismäßig zu wenige schnelle Moleküle vorhanden. Stellen wir uns nun vor, dass die Verdunstung gestoppt wird, indem wir die Tasse mit einem Deckel verschließen. Jetzt wird es interessant.

Denn nach dem Verschließen kann der Kaffee nur dann zurück ins Gleichgewicht gelangen, wenn sich die Bewegungsenergie innerhalb der Flüssigkeit umverteilt. Genau das geschieht, wenn die Moleküle zusammenstoßen und daraufhin ihre Geschwindigkeiten ändern. Dabei sorgt der physikalische Grundsatz, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems stets erhalten bleibt, dafür, dass einige wenige Moleküle die Rolle der zuvor entflohenen „Hitzköpfe“ übernehmen, also Energie gewinnen. Dadurch ermöglichen sie es der Mehrzahl der Teilchen, etwas Energie abzugeben. Insgesamt gesehen sinkt dadurch die mittlere Energie pro Molekül – der Kaffee kühlt ab.

Nach Boltzmann nimmt bei dieser Rückkehr ins Gleichgewicht die Unordnung des Systems – auch als „Entropie“ bezeichnet – zu. Das bedeutet: Der sich herausbildende, weniger geordnete Gleichgewichtszustand ist wahrscheinlicher als der Ausgangszustand in dem Moment, als der Deckel aufgesetzt wurde. Die Wahrscheinlichkeit des weniger geordneten Gleichgewichtszustandes ist deshalb

#### Quantenphysikalische Grundlagenforschung

Das Zentrum für Quantendynamik wurde im Jahr 2010 im Rahmen der Exzellenzinitiative als Teil des Zukunftskonzepts der Universität Heidelberg eingerichtet. Ziel des von Matthias Weidemüller geleiteten Zentrums ist es, die Grundlagenforschung im Bereich der Quantenphysik voranzutreiben. Die Arbeitsgruppen widmen sich unter anderem Phänomenen nahe des absoluten Nullpunkts der Temperatur sowie quantenmechanischen Effekten in ultraschnellen Prozessen bis hin zu biologisch relevanten Prozessen. Im Vordergrund stehen die Dynamik von Systemen und die Entwicklung von Nicht-Gleichgewichtszuständen. Auch Anwendungen rücken in greifbare Nähe, beispielsweise indem sich Wissenschaftlerteams mit der Rolle der Quantenphysik bei der Messung physikalischer Größen beschäftigen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten haben Einfluss auf zukünftige Hochpräzisionsmessungen, wie sie etwa für das Navigationssystem GPS von Bedeutung sind.

Am Zentrum für Quantendynamik beteiligen sich Arbeitsgruppen der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg, der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften sowie des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik. Wichtige Kooperationspartner sind die Graduiertenschule „Fundamental Physics“ sowie die „Max Planck International Research School on Quantum Dynamics in Physics, Chemistry and Biology“.

<http://cqd.uni-heidelberg.de>

# „So paradox es klingen mag: Kehrt ein System ins Gleichgewicht zurück, nimmt seine Unordnung zu.“

höher, weil es sozusagen mehr Möglichkeiten gibt, Unordnung als Ordnung zu schaffen – was uns allen ja aus dem Alltag nicht ganz fremd sein dürfte. Es gibt schlichtweg mehr Möglichkeiten, Dinge unordentlich im Zimmer zu verteilen, als sie geordnet übereinanderzulegen, beispielsweise auf einem Stapel. Um die jeweiligen Möglichkeiten abzählen zu können, schreibt man lediglich die mittlere Energie der Teilchen vor. Im Zustand maximaler Entropie ist das System im Gleichgewicht.

Soweit erscheint uns in der Physik der allgegenwärtige Prozess der „Thermalisierung“ eines Systems – also der Entwicklung aus einem Anfangszustand außerhalb des Gleichgewichts zurück ins thermische Gleichgewicht – gut verstanden zu sein. In den Stoßgesetzen der Teilchen ist zwar keine Zeitrichtung zu erkennen, dennoch bewegt sich das Gesamtsystem stets in die Richtung eines Zustandes, der wahrscheinlicher ist als derjenige im zuvor erzeugten Ungleichgewicht. Dieser Prozess wird als irreversibel erfahren – wie auch ein Schreibtisch sich spontan nicht selbst aufräumt.

## Kritisch verlangsamte Prozesse

Trotz der soeben beschriebenen Stimmigkeit zwischen Beobachtung und Theorie liegt – nicht unerwartet – die Tücke im Detail. Was genau geschieht auf dem Weg ins Gleichgewicht? Gibt es möglicherweise Abstufungen im Grad der Wahrscheinlichkeit, die es nahelegen, mehr Szenarien als „nur“ Gleichgewicht und Nicht-Gleichgewicht zu unterscheiden? Gibt es vielleicht sogar Bedingungen, unter denen sich gar kein Gleichgewicht einstellen kann?

Träumen wir uns zurück in den Urlaub: Das Stop-and-Go auf der Autobahn überspannt allzu oft unsere Nerven.

Aber es erlaubt uns auch, zu entschleunigen, einen scheinbar zeitlosen Zustand im „Dazwischen“ zu erleben. Physiker sprechen vom „Drift“, einer stark verlangsamten, schleichenden Bewegung. Sie scheint weder im Gleichgewicht noch im Nicht-Gleichgewicht zu sein. Und wie so oft ist es dieser Übergangszustand, der die spannendsten Fragen bereithält.

Fensterglas beispielsweise ist eigentlich eine extrem zähe Flüssigkeit. Die Moleküle im Glas können keine wohlgeordnete Kristallstruktur annehmen, stets kann irgendwo ein Molekül seine Lage wechseln, was wieder den Platzwechsel eines anderen möglich macht und so fort. Man nennt diese Dynamik „kritisch verlangsamte“. Die zeitliche Veränderung ist dabei nicht mehr durch die Exponentialfunktion charakterisiert, sondern durch ein Potenzgesetz in der Zeit. Zur Verdeutlichung: Die Exponentialfunktion beschreibt schnelle Prozesse, zum Beispiel die Inflation. Pro Jahr – also in gleichen Zeitabständen – sinkt die Kaufkraft einer Währung um den Prozentsatz, der der Inflationsrate entspricht. Bei kritischer Verlangsamung – das heißt nach einem Potenzgesetz – würde das Geld nach 2, 4, 8, 16, 32 Jahren und so weiter einen jeweils gleichen Prozentsatz an Wert verlieren.

Kritisch verlangsamte Prozesse treten typischerweise in Systemen auf, die in die Nähe eines Phasenübergangs geraten. Ein einfaches Beispiel für einen Phasenübergang ist der Wechsel des Aggregatzustands eines Stoffes, etwa beim Schmelzen oder Kondensieren. Bei unseren Forschungsarbeiten an Quantengasen interessieren uns besonders solche Phasenübergänge, die in ähnlicher Weise auch in magnetisierbaren Materialien auftreten: der Übergang zwischen der magnetisierten und der ungeordneten

Phase eines ferromagnetischen Materials etwa, der bis heute für die Datenspeicherung auf Computerfestplatten genutzt wird. Was geschieht dabei?

Mit einem von außen angelegten Magnetfeld ist es möglich, die „Spins“ vieler benachbarter Elektronen parallel zueinander auszurichten, ähnlich einer Ansammlung mikroskopischer Magnetnadeln. Im einfachsten Fall – indem man das Feld alternativ in entgegengesetzten Richtungen anlegt – lässt sich so ein „bit“, also die Information „0“ oder „1“ codieren, die sehr lang erhalten bleibt, nachdem das Magnetfeld abgeschaltet wurde. Allerdings darf man die Festplatte nicht über ihre sogenannte Curie-Temperatur von einigen Hundert Grad Celsius aufheizen. Dann ginge die magnetische Ordnung und damit die Information verloren, weil das Material in die ungeordnete Phase übergeht, in der die einzelnen Spins in zufällige Richtungen zeigen.

Tut man es doch und kühlt das Material anschließend wieder bis unterhalb der Curie-Temperatur ab, kann man die kritische Verlangsamung beobachten: Das System ist zunächst ungeordnet und damit aus dem Gleichgewicht. Nur langsam bewegt es sich in Richtung eines geordneten – und damit magnetisierten – Zustands. Doch auf welche Art und Weise wird geordnet, so ganz ohne Magnetfeld?

Zuerst beginnen nebeneinanderliegende Spins spontan, sich wie Kompassnadeln aneinander auszurichten. Nach und nach gesellen sich mehr Elektronenspins hinzu, bis in dem Material viele aneinanderstoßende „Weiss-Bezirke“ entstanden sind (nach dem elsässischen Physiker Pierre-Ernest Weiss). In jedem dieser ausgedehnten Bereiche sind die Magnetnadeln parallel zueinander ausgerichtet. Sie zeigen jedoch in eine – relativ zur Magnetisierung in den Nachbarbezirken – zufällige Richtung. Wartet man noch länger, geht die Zahl der Bezirke zurück, da die einen auf Kosten der anderen anwachsen. Ihre durchschnittliche Größe nimmt dementsprechend zu, und zwar mit einem Potenzgesetz in der Zeit. Es handelt sich hierbei um eine kritisch verlangsamte Bewegung in Richtung eines überall gleich magnetisierten Gleichgewichtszustands.

Kritisch verlangsamte Prozesse lassen sich in wenige dynamische Universalitätsklassen einteilen, und zwar entsprechend der Art und Weise, wie sie zum Gleichgewichtszustand zurückfinden; genauer ausgedrückt: entsprechend des in den Potenzgesetzen jeweils auftretenden Exponenten. Vertreter einer Universalitätsklasse zeigen hierbei dasselbe Verhalten, während sie im Übrigen sehr unterschiedlicher Natur sein können. Die Diffusion von Proteinen in Zellmembranen lässt sich beispielsweise einer Universalitätsklasse der Ferromagneten zuordnen. Nur eine begrenzte Zahl solcher Klassen ist bislang bekannt – neue Universalitätsklassen zu entdecken, ist gebietsübergreifend interessant.

„Bis heute ist vieles  
noch immer  
nicht verstanden –  
vor allem dort,  
wo die Quantenphysik  
im Spiel ist.“

In meiner Arbeitsgruppe untersuchen wir seit mehreren Jahren Turbulenz und Strukturbildung in Modellsystemen, die für Quantengase, aber auch in anderen Bereichen der Physik Verwendung finden. In vieler Hinsicht ähneln die Phänomene in unseren Modellsystemen dem Anwachsen der Weiss-Bezirke in Ferromagneten. Dennoch warten sie oft mit Überraschungen auf: Unsere Computersimulationen etwa weisen auf die Existenz extrem kleiner Exponenten in den Potenzgesetzen hin. Die kritische Verlangsamung ist dann so stark, dass das Gleichgewicht nicht innerhalb einer realistischen Zeit erreicht werden kann. Wir führen die starke Verlangsamung darauf zurück, dass sich im Quantengas spezielle, sogenannte topologische Strukturen ausbilden. Diese Strukturen zu entfernen kann so schwierig sein, wie ein verheddertes Wollknäuel zu entwirren. Fällt die von uns beobachtete Verlangsamung womöglich in eine bislang unbekannte Universalitätsklasse?

#### Die Dynamik des jungen Universums

Die Arbeiten unseres Kollegen Jürgen Berges vom Institut für Theoretische Physik haben uns dazu angeregt, solche Fragen näher zu untersuchen. Berges und seine Mitarbeiter haben für die Dynamik des noch jungen Universums (circa  $10^{-33}$  bis  $10^{-30}$  Sekunden nach dem Urknall) die Existenz von „nichtthermischen Fixpunkten“ postuliert. An einem solchen Fixpunkt könnte die räumliche Strukturierung von Materie in einer turbulenten, kritisch verlangsamten Weise vonstattengegangen sein.

OUT OF BALANCE

# STANDSTILL & MOTION

THOMAS GASENZER

Equilibrium is a dominating characteristic of nature: Forces acting on every object, on every molecule or atom, mutually balance each other. But in fact, nature literally ‘lives’ on overcoming equilibrium – if it did not, life as we know it would not be possible. The constant change between ‘stop’ and ‘go’ leads us to the interesting question of how equilibrium states – e.g. of gaseous or liquid matter – form, and whether they invariably form at all. What exactly happens in a cup of tea that is cooling down? Although these questions have been on the table since the beginning of industrialisation at least, some intricate problems remain unsolved.

Today, ultra-cold atomic quantum gases, prepared in the lab at temperatures very close to absolute zero, allow us to construct specific model systems that enable us to perform precision measurements of their dynamic properties. We can use them to study how an equilibrium state is reached when starting from a particular, well-defined non-equilibrium state. In especially interesting cases, this equilibration proceeds extremely slowly, so that equilibrium is de facto never reached. Window glass, for example, is an amorphous substance, rather like a highly viscous liquid and can be regarded as an example for such ‘critically slowed’ relaxation.

Critical slowing down typically occurs when a system is brought close to a phase transition separating different forms of ordering; in this case, from a liquid to a solid state. It is a universal phenomenon, which means that the same mathematical laws apply to very different realisations of it in nature. Researchers in the experiment-theory unit ‘Synthetic Quantum Systems’ in Heidelberg aim to explore these phenomena and possibly identify new universality classes of critical slowing down. The project brings together physicists from disciplines as different as early-universe cosmology, nuclear and heavy-ion physics, and ultracold atomic gases. Table-top experiments with cold atoms may, for instance, help us simulate certain aspects of outer-space phenomena that could otherwise never be examined in a lab. ●

PROF. DR THOMAS GASENZER heads a theoretical research group at Heidelberg University's Kirchhoff Institute for Physics within the experiment-theory unit 'Synthetic Quantum Systems' (SynQS). Until 2014 he worked at the University's Institute for Theoretical Physics, from 2006 onward on a Heisenberg Fellowship of the German Research Foundation. He was a postdoctoral research fellow at the University of Oxford (UK) and a visiting researcher at JILA, Boulder, Colorado (USA). Prof. Gasenzer coordinates the 'Analog Quantum Simulators for Many-Body Dynamics' (AQuS) network in the EU-funded Horizon 2020 'Future and Emerging Technologies' programme, working with partners in Berlin, Cambridge, Heidelberg, Munich, Paris, Trento and Vienna. In addition, he is a principal investigator in the Collaborative Research Centre 1225 'Isolated Quantum Systems and Universality in Extreme Conditions' (ISOQUANT). In 2016 he became Managing Director of the Heidelberg Center for Quantum Dynamics (CQD).

Contact: [t.gasenzer@uni-heidelberg.de](mailto:t.gasenzer@uni-heidelberg.de)

**“Equilibrium is a dominating characteristic of nature. But in fact, nature literally lives on overcoming equilibrium – without this constant change between ‘stop’ and ‘go’, life as we know it would not be possible.”**



Für ein vereinfachtes Modell der Dynamik nach dem Urknall konnten wir zeigen, dass dabei Materie und Antimaterie räumlich voneinander getrennt werden und dann nur sehr langsam wieder zueinanderfinden – ähnlich wie in der patchworkartigen Verteilung der Weiss-Magnetisierungsbezirke. Ein derartiger Prozess könnte vielleicht erklären, warum das für uns sichtbare Universum fast keine Antimaterie enthält. Unsere Existenz – wie auch die der hundert Milliarden Galaxien im All – wäre dann kritisch verlangsamer Dynamik zu verdanken, und die betreffende Dynamik könnte nebenbei einer Universalitätsklasse angehören, zu der auch Phänomene in magnetischen Materialien oder in kalten Quantengasen zählen.

Solchen fundamentalen Fragen wollen wir am Kirchhoff-Institut zusammen mit Markus Oberthaler und seinem Team in unserer Arbeitsgruppe „Synthetische Quantensysteme“ auf den Grund gehen. Kürzlich ist es uns bereits gelungen, Potenzgesetze in der Dynamik eines Quantengases aus Rubidium-Atomen nachzuweisen: Hierfür werden einige Zehntausend Atome in einer wenige Mikrometer kleinen Gaswolke nur einige Nanokelvin ( $10^{-9}$  Grad) über dem absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273,15 Grad Celsius präpariert und dann aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Atome selbst bleiben dabei fast in Ruhe. Ihre magnetischen Ausrichtungen aber beginnen sich gegeneinander zu verdrehen.

Derzeit sind wir einer extremen Form kritischer Verlangsamung in der Ausbildung Weiss-artiger Bezirke der Atomspin-Ausrichtung auf der Spur. Die Anordnung, die wir dabei für unsere Experimente gewählt haben, hat eine Besonderheit: Nur entlang einer geraden Linie im Raum haben die Gase Bewegungsfreiheit, senkrecht dazu werden sie von elektromagnetischen Kräften festgehalten. Die Atome sind also wie Kugeln auf einer Perlenschnur aufgereiht. Die Dynamik in solchen „eindimensionalen Quantengasen“ unterliegt speziellen Regeln: Sie können unter anderem dazu führen, dass die Gase praktisch nie ein thermisches Gleichgewicht erreichen.

Das liegt vor allem daran, dass fast immer nur zwei benachbarte Atome aneinanderstoßen und die Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß dieselben sind. Erst bei dem sehr seltenen gleichzeitigen Aufeinandertreffen dreier Atome am gleichen Ort kann sich die Verteilung der Geschwindigkeiten ändern. Experimente in der Gruppe von Jörg Schmiedmayer an der Technischen Universität Wien haben ergeben, dass aufgrund dieser Effekte außergewöhnliche Zustände erreicht werden können. Mit meiner Arbeitsgruppe begleitete ich diese Untersuchungen von der theoretischen Seite. Unsere im vergangenen Jahr im Fachjournal „Science“ veröffentlichten Resultate zeigen vereinfacht ausgedrückt: Eindimensionale Atomgase können mehrere Temperaturen zugleich aufweisen, und dieser Zustand ist äußerst stabil.

**„Unsere Existenz – wie auch die der hundert Milliarden Galaxien im All – könnten wir einer kritisch verlangsamen Dynamik verdanken.“**

Zusammen mit Markus Oberthaler wollen wir nun herausfinden, ob die Einschränkung der Bewegung auf eine Raumdimension auch die kritische Verlangsamung im Gas der Atome mit Spin entscheidend beeinflusst und ob sich dabei bislang unbekannte Universalitätsklassen nachweisen lassen. Solche Systeme sind von grundlegendem Interesse für die Entwicklung der Technik im Bereich des „Quantencomputing“. Angesichts der Grenzen weiterer Miniaturisierungen in der konventionellen Hardwaretechnik und der daraus folgenden Notwendigkeit, Informationsdaten unter viel geringerem Energieaufwand verarbeiten zu können, werden diese Technologien unsere Zukunft mitbestimmen.

Darüber hinaus arbeiten im Rahmen des in Heidelberg neu eingerichteten Sonderforschungsbereichs „ISOQUANT“ Wissenschaftler vom Institut für Theoretische Physik, vom Kirchhoff-Institut und Max-Planck-Institut für Kernphysik, vom Physikalischen Institut und von der Technischen Universität Wien zusammen. Eines der wichtigsten Ziele des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs ist es, universelle Aspekte von Dynamik zu ergründen. Neben ultrakalten Quantengasen stehen dabei weitere Phänomene im Zentrum, die ebenfalls noch viele Geheimnisse bergen. Eines dieser geheimnisvollen Phänomene ist ein Plasma aus Quarks und Gluonen, das wenige Zehntel Mikrosekunden lang das Universum nach dem Urknall ausfüllte und in Kollisionen schwerer Ionen im Labor erzeugt werden kann. Wir untersuchen dieses Plasma derzeit am „Large Hadron Collider“ in der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) in Genf. Weitere Experimente sollen künftig im geplanten Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt erfolgen. ●

**IM**

**DA**

**SCHEN**

**ZWI**

IM DAZWISCHEN

# TRANSITERFAHRUNGEN IN EINER VERNETZTEN WELT

ROLAND WENZLHUEMER

**Als Folge von Globalisierungsprozessen waren und sind Transitphasen – Zeiten des Durchgangs und des Dazwischen-Seins – für viele Menschen prägender Bestandteil der Lebensgeschichte. Wer verstehen will, was die vernetzte Welt für den Menschen bedeutet, muss auch und vor allem Transitphänomene und ihre Auswirkungen auf die Betroffenen verstehen. Heidelberger Wissenschaftler beleuchten diesen in der Forschung lange vernachlässigten Aspekt.**

## A

Aktuelle Gesellschaftsdiagnosen verweisen geradezu habituell darauf, dass unsere Welt in bisher nicht gekanntem Ausmaß in Bewegung ist. Menschen migrieren, Informationen werden weltweit in Sekundenschnelle ausgetauscht, global gehandelte Waren bestücken die Regale unserer Supermärkte. Solchen Befunden die nötige Tiefenschärfe beizubringen, ist Aufgabe der Globalgeschichte. Historikerinnen und Historiker der Universität Heidelberg beschäftigen sich hierzu mit Globalisierungsprozessen des 19. Jahrhunderts und nehmen dabei insbesondere Transiterfahrungen in den Blick.

In unserer globalisierten Welt ist der Transit – lateinisch für Durchgang – ein allgegenwärtiges Phänomen. Vernetzung baut auf der Bewegung von Menschen, Dingen oder Ideen

auf – und Bewegung bedeutet immer Durchgang. Griffige Beispiele für die Rolle des Transits in Vernetzungszusammenhängen gibt es viele, etwa der Transitbereich auf internationalen Flughäfen, der für viele Fluggäste eine unkomplizierte Durchreise erlaubt. Als gebürtiger Österreicher muss ich bei dem Wort Transit fast zwangsläufig an die Debatten über den Alpen transitverkehr denken, die in meinem Heimatland viele Jahre sehr intensiv geführt worden sind. Und natürlich ist das Wort Transit in den letzten Monaten auch im Zusammenhang mit den Flüchtlingsbewegungen häufig gefallen, etwa wenn die Einrichtung von Transitzonen für Flüchtlinge gefordert wurde. Dies sind nur einige wenige zeitgenössische Beispiele, die illustrieren, dass Globalisierungsprozesse, die zwangsläufig auf Bewegung aufbauen, immer Transitphänomene hervorbringen.

### Nötiger Perspektivwechsel

Bei all diesen Beispielen fällt auf, dass der Transit vom durchquerten Raum her gedacht wird. Dieser Raum, dieses Gebiet, stellt den fixen Punkt, von welchem wir auf Durchgangsphänomene blicken. Das im Transit Befindliche wird dabei in Bewegung gesehen, als etwas, das nur vorübergehend zum Transitraum gehört, quasi auf der Durchreise ist. Das gilt für die Flugreisenden im Transitbereich ebenso wie für die transalpinen Lastkraftwagen – und aus der Sicht so mancher wohl auch für die vor Krieg und Verfolgung Flüchtenden. Dies ist aber nur eine mögliche Perspektive auf Transitphänomene, die vor allem aus der wahrgenommenen (oder ersehnten) Stabilität eines Raumes heraus auf die Bewegung durch diesen Raum blickt. Eine andere Perspektive hingegen wird häufig vernachlässigt, nämlich jene der im Transit Befindlichen selbst.

Es gibt immer zumindest zwei Perspektiven auf Verbindungsprozesse und die sie prägenden Bewegungen: jene von außen auf die Bewegung und jene aus der Bewegung auf die Umgebung. Dieser Sachverhalt ist wenig erstaunlich und erschließt sich recht intuitiv. Erstaunlicher ist da schon die Tatsache, dass die Geistes- und Kulturwissenschaften in ihrer Beschäftigung mit Bewegung, mit Vernetzungsphänomenen und Globalisierungsprozessen zumeist die erstere Perspektive deutlich privilegieren. Beispielhaft möchte ich dies für meinen eigenen Forschungsbereich, die Globalgeschichte, festhalten. Dieser interessiert sich für die Entstehung und Bedeutung transregionaler und globaler Verbindungen in der menschlichen Geschichte. Er fragt, wie und warum Menschen solche Verbindungen geschaffen haben, wie diese Verbindungen gleichzeitig aber auch das Denken und Tun der Menschen beeinflusst haben. Dass eine solche Fragestellung zwangsläufig auf die Beobachtung von Bewegung – sei es auf jene von Menschen, von Waren oder von Ideen – verweist, versteht sich von selbst. Allerdings blickt die Globalgeschichte in den allermeisten Fällen analytisch von einem festen Punkt auf die untersuchte Bewegung. Man beschäftigt sich mit Haf-



**PROF. DR. ROLAND WENZLHUEMER** ist seit dem Jahr 2014 Professor für Neuere Geschichte mit dem Schwerpunkt des 19. und 20. Jahrhunderts in Heidelberg. Er forscht und lehrt am Historischen Seminar der Universität, das zum Zentrum für Europäische Geschichts- und Kulturwissenschaften (ZEGK) gehört, sowie am Heidelberger Exzellenzcluster „Asien und Europa im globalen Kontext“. Zuvor war er unter anderem am Großbritannien-Zentrum der Humboldt-Universität zu Berlin tätig, am Europainstitut der Universität Basel und an der Universität Innsbruck. Roland Wenzlhuemer beschäftigt sich hauptsächlich mit der Geschichte von Globalisierungsprozessen und untersucht diese zumeist im Rahmen der britischen Kolonialgeschichte des 19. Jahrhunderts. Die im Beitrag genannte Forschung zu Schiffszeiten führt er zusammen mit der Doktorandin Johanna de Schmidt durch.

Kontakt: [roland.wenzlhuemer@zegk.uni-heidelberg.de](mailto:roland.wenzlhuemer@zegk.uni-heidelberg.de)

städten als kulturellen Schmelztiegeln oder – wie in meinem Fall – mit der Bedeutung eines globalen Telegrafennetzwerks im 19. Jahrhundert. So interessant und zielführend das in vielen Fällen ist, so sehr fehlt häufig die Perspektive aus der Bewegung heraus.

### Schmerzliche Leerstelle

Das ist für einen globalhistorischen Zugriff insofern problematisch, da für viele Menschen Transitphänomene eben nicht nur von außen zu beobachten waren, sondern sie selbst sich teilweise lange Zeit im Transit befunden und die Welt aus dieser Warte wahrgenommen haben. Transiterfahrungen waren (und sind auch heute noch) für viele Menschen freiwillig oder unfreiwillig ein prägender Bestandteil ihres Lebens, der direkte Konsequenzen für ihr Weltbild, für ihr Fühlen, Denken und Handeln hat. Der übliche Blick auf den Transit vom durchquerten Raum aus kann solche Transiterfahrungen nicht erkennen, und dadurch lassen sich die Lebenswelten von Menschen im Transit auch nur schwer erfassen. Hinsichtlich des Verständnisses dafür, was eine vernetzte Welt eigentlich für die Menschen bedeutete, ist dies eine schmerzliche Leerstelle, die wir im Rahmen eines globalhistorischen Forschungsprojekts an der Ruperto Carola füllen wollen. Dieses Vorhaben ist aus einem Teilprojekt des Exzellenzclusters „Asien und Europa im globalen Kontext“ hervorgegangen. Zusammen mit Martin Dusing, Professor für Globalgeschichte an der Universität Zürich, haben wir es in den letzten Jahren weiterentwickelt. Ab 2017 wird es nun von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Schweizer Nationalfonds gemeinsam gefördert.

Ziel unseres Forschungsvorhabens ist es, die Phase des Transits zu fokussieren und dafür auch den Begriff selbst konzeptuell weiterzuentwickeln. So verstehen wir Transit als eine Phase des Herausgenommen-Seins aus den gewohnten Lebensumständen. Der Transit zeichnet sich dabei einerseits durch eine Form von Bewegung aus, die aber gleichzeitig mit räumlicher Abgrenztheit und einem beschränkten Handlungsvermögen einhergeht. Wir verstehen den Transit als Durchgang, aber explizit nicht als Übergang – also nicht als eine graduelle Annäherung von einem Ausgangspunkt an ein bestimmtes Ziel. Vielmehr ist der Transit für uns ein ganz eigener soziokultureller Abschnitt.

### Schiffspassagen als eigener Erfahrungsraum

Empirisch versuchen wir, dies vor allem anhand des Studiums interkontinentaler Schiffspassagen zu belegen und damit unsere Kenntnis über die Bedeutung von Transitphasen weiter zu schärfen. Unsere Aufmerksamkeit gilt dabei der Passagierschiffahrt in der zweiten Hälfte des sogenannten „langen 19. Jahrhunderts“, also grob von circa 1850 bis zum Ausbruch des Ersten Weltkrieges. Wir untersuchen in diesem Zusammenhang vor allem Dampfschiffpassagen. Diese Überfahrten stellen für uns überaus brauchbare

# „Transiterfahrungen haben direkte Konsequenzen für das Weltbild, für das Fühlen, Denken und Handeln der Menschen.“

Laborsituationen dar. Selbst nachdem zu Beginn des 19. Jahrhunderts ein Bündel von technologischen Neuerungen die Schifffahrt stark beschleunigt hatte, dauerten solche interkontinentalen Passagen immer noch eine recht lange Zeit. Für eine Fahrt zwischen Europa und Nordamerika über den Atlantik kann man Ende des Jahrhunderts von einer durchschnittlichen Dauer von etwa zehn Tagen ausgehen. Reisen nach Indien oder gar Australien dauerten oft mehr als einen Monat oder sogar zwei Monate. Während dieser Zeit teilten Crew und Passagiere den begrenzten Raum des Schiffes und waren damit im Transit festgesetzt. Stillstand in Bewegung, so könnte man sagen.

Für die Menschen im Transit ergab sich dadurch ein ganz eigener Erfahrungsraum. Sie waren aus ihren normalen Lebenswelten herausgenommen, eingeschränkt in ihren Handlungsoptionen und eingeschränkt auch in der Wahrnehmung ihrer Umgebung. Das heißt aber nicht, dass solche Transitphasen für die Betroffenen nicht zu stark prägenden Lebensabschnitten werden konnten. Um beim Beispiel von Schiffspassagen zu bleiben: Die Bewegungs- und Spielräume auf einem Schiff waren üblicherweise knapp. Man teilte diesen sehr begrenzten Raum mit einer Menge anderer Menschen, die man nicht kannte, deren Bekanntheit man sich nicht ausgesucht hatte, denen man aber

auch schlecht aus dem Weg gehen konnte. Diese Situation mag dem einen oder anderen Leser vielleicht von der letzten Flugreise oder aus dem ICE-Abteil bekannt vorkommen, sie war aber von ganz anderer zeitlicher Dauer und daher auch von weit größerer soziokultureller Prägestärke.

Leonard Woolf, der Ehemann der britischen Autorin Virginia Woolf, beschrieb in seiner Autobiografie „Growing“ die Erfahrungen einer Schiffspassage, die er selbst Anfang des 20. Jahrhunderts nach Ceylon unternommen hatte. Er schrieb über das Leben auf dem Schiff:

„Within the boat there was the uncomfortable atmosphere of suspicion and reserve which is at first invariably the result when a number of English men and women, strangers to one another, find that they have to live together for a time in a train, a ship, a hotel. In those days it took, if I remember rightly, three weeks to sail from London to Colombo. By the time we reached Ceylon, we had developed from a fortuitous concourse of isolated human atoms into a complex community with an elaborate system of castes and classes. The initial suspicion and reserve had soon given place to intimate friendships, intrigues, affairs, passionate loves and hates.“

Hier wird deutlich, dass in solchen Transitphasen das soziokulturelle Leben der Passagiere weiterging, dass die Reisenden Erfahrungen machten und austauschten, dass sich Zuneigungen, Abneigungen und Meinungen unter den ganz besonderen Bedingungen des Transits herausbildeten, aber natürlich auch darüber hinaus Bestand hatten.

Transitphasen sind nicht von ephemerer Bedeutung, sondern stellen für die Betroffenen einen Lebensabschnitt dar, dessen Erfahrungen und Eindrücke für viele von langer, prägender Wirkung sind. Daher muss, wer Vernetzungsphänomene verstehen will, auch und vor allem Transitphasen verstehen. In unserem Forschungsprojekt, das sich zur Untersuchung des Transits exemplarisch auf Transiterfahrungen im Rahmen von Schiffspassagen im späten 19. Jahrhundert konzentriert, verfolgen wir verschiedene Ansätze, um die Signifikanz dieser Phase besser greifen zu können. Wie das aussehen kann, möchte ich an dieser Stelle anhand eines Teilprojekts illustrieren, in dem wir uns mit dem Studium sogenannter Schiffszeitungen beschäftigen. Dabei handelt es sich um Zeitungen, die auf langen Interkontinentalpassagen von den Passagieren selbst hergestellt wurden und sich an die Schiffsgemeinschaft richteten.

## Direkter Zugriff auf Transiterfahrungen

Obwohl die zur Verfügung stehenden personellen und technischen Mittel üblicherweise sehr beschränkt waren, gehörte die Herausgabe einer Schiffszeitung zumindest auf britischen Schiffen im 19. Jahrhundert zum guten Ton.

# „Wir verstehen den Transit als Durchgang, aber explizit nicht als Übergang. Er ist für uns ein ganz eigener soziokultureller Abschnitt.“

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden viele große Dampfschiffe mit Funkapparaten ausgestattet, und damit kamen nun auch Nachrichten aus aller Welt an Bord. Damit veränderte sich die Produktion von Schiffszeitungen grundlegend. Als bald hatten die Passagiere mit der Gestaltung der Zeitungen nichts mehr zu tun. Diese neuen, oft von der Reederei herausgegebenen Zeitungen, die es heute noch in verschiedenen Formen gibt, überschrieben die ältere Gattung der Passagierzeitung. Diese geriet sowohl als kulturelle Praxis wie auch als historische Quelle praktisch völlig in Vergessenheit. Nur ein Zufallsfund in einem britischen Archiv hat uns auf die Spur dieser Mediengattung geführt.

Uns erlaubt das Studium dieser höchst ungewöhnlichen Quellen einen viel unmittelbareren Zugriff auf die Transiterfahrungen der Passagiere, als das bisher möglich gewesen ist. In diesen Zeitungen, von denen wir mittlerweile weit über hundert Titel untersuchen konnten, wird deutlich, dass die Welt des Transits für die Passagiere gleichzeitig sehr klein und sehr groß war, dass man sich einerseits über den gesamten Erdball bewegte und andererseits auf einem kleinen Schiff inmitten des Ozeans festsaß. Es zeigt sich, wie sich im engen Raum des Schiffs während der Passage eine Gemeinschaft formte, die ihren eigenen Blick auf die durchquerte Welt entwickelte – ähnlich wie es auch in Leonard Woolfs oben zitiert Beschreibung zum Ausdruck kommt. Da in diesen Schiffszeitungen Passagiere für andere Passagiere schrieben, offenbart sich hier die ganz besondere Situation des Transits. Bei der Lektüre der Zeitungen ist spürbar, wie prägend dieser Lebensabschnitt für viele Reisende war. Ein Hinweis darauf ist auch die Tatsache, dass man die Schiffszeitungen nach

der Passage gewöhnlich von einer professionellen Druckerei nachdrucken ließ und viele Passagiere diese Nachdrucke als Erinnerung an die Reise erstanden.

Die Forschungsarbeit zu den Schiffszeitungen ist ein Teil unseres größeren Projekts. Andere Studien werden etwa auf Lese- und Schreibpraktiken im Transit blicken oder sich mit den emotionalen und psychopathologischen Dimensionen des Im-Transit-Seins beschäftigen. Insgesamt mag die Beschäftigung mit historischen Transiterfahrungen an Bord von interkontinental verkehrenden Schiffen im

## **Geschichte und Kultur Europas und der Neuen Welt**

Das 2005 gegründete Zentrum für Europäische Geschichts- und Kulturwissenschaften (ZEGK) ist ein Zusammenschluss von fünf Heidelberger Instituten: dem Historischen Seminar, dem Institut für Fränkisch-Pfälzische Geschichte und Landeskunde, dem Institut für Europäische Kunstgeschichte, dem Institut für Religionswissenschaft sowie dem Musikwissenschaftlichen Seminar. Ziel der Wissenschaftler am Zentrum ist es, die Geschichte und die kulturellen Errungenschaften Europas und der Neuen Welt vom Frühmittelalter bis in die heutige Zeit zu erforschen. Durch die Allianz im ZEGK verstärken sie dabei ihre Kooperationen, nutzen Synergieeffekte und gewinnen in Lehre und Forschung an interdisziplinärer Kompetenz und Sichtbarkeit.

[www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/zegk](http://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/zegk)

IN BETWEEN

# TRANSIT EXPERIENCES IN A NETWORKED WORLD

ROLAND WENZLHUEMER

In the globalised world, transit – Latin for ‘passage’ – is a ubiquitous phenomenon. Networking is based on the movement of people, things or ideas. And movement always means passing across, or through, a place. As a result of globalisation processes, phases of transit were and are a defining part of many peoples’ life story. If we want to understand what the connected world means for people, we first need to understand transit phenomena – not from the usual perspective of the room being crossed, but from that of the people in transit themselves. Heidelberg historians are investigating this long-neglected aspect in a new global history research project.

The researchers want to bring the experience of transit into focus and, in doing so, also extend the meaning of the term. They understand transit as a period of being removed from the normal circumstances of one’s life, as a unique socio-cultural phase. The historians found evidence for this view of transit phenomena in their study of so-called ship newspapers that were prepared by passengers on intercontinental voyages in the second half of the 19th century. A more nuanced understanding of transit, which looks from the movement itself to the environment, helps us better understand today’s transit phenomena and develop an idea of their socio-cultural shaping power. With this project, the researchers also want to make a conceptual contribution to current debates about people in transit – whether they are part of an increasingly location-independent work environment or are fleeing war and persecution. ●

PROF. DR ROLAND WENZLHUEMER has held the Heidelberg Chair of Modern History with special focus on the 19th and 20th centuries since 2014. He teaches and conducts research at the University's Department of History, which belongs to the Centre for European Historical and Cultural Studies (ZEGK), and at the Heidelberg Cluster of Excellence 'Asia and Europe in a Global Context'. He previously held positions at the Centre for British Studies of Humboldt University in Berlin, at the University of Basel's Institute for European Global Studies and at the University of Innsbruck. Roland Wenzlhuemer is particularly interested in the history of globalisation processes, which he usually studies within the framework of 19th century British colonial history. The research on ship newspapers mentioned in the article was conducted together with doctoral student Johanna de Schmidt.

Contact: roland.wenzlhuemer@zegk.uni-heidelberg.de

**“We understand transit as a passage, but explicitly not as a transition. To us, transit is a unique socio-cultural phase.”**



19. Jahrhundert auf den ersten Blick weit weg und lediglich von akademischer Relevanz erscheinen. Ein geschärftes Verständnis von Transit, das den Blick aus der Bewegung heraus auf die Umgebung sucht, hilft aber auch dabei, gegenwärtige Transitphänomene besser zu verstehen und hinsichtlich ihrer soziokulturellen Prägekraft zu begreifen. Mit dem laufenden Forschungsprojekt wollen wir somit zugleich einen konzeptuellen Beitrag zu aktuellen Debatten über Menschen im Transit leisten – sei es im Rahmen einer immer ortsunabhängigeren Arbeitswelt oder auch hinsichtlich der Flucht vor Krieg und Verfolgung. ●

#### **Austauschprozesse zwischen Asien und Europa**

Der Exzellenzcluster „Asien und Europa im globalen Kontext“ ist ein interdisziplinärer Forscherverbund an der Universität Heidelberg. Etwa 200 Wissenschaftler analysieren Austauschprozesse zwischen Kulturen, die von Migration und Handel bis hin zu Leitbegriffen der Sprachen und Strukturen des Staates reichen. Eine zentrale Frage ist, in welchen Dynamiken sich kulturübergreifende Prozesse sowohl zwischen als auch innerhalb von Asien und Europa entwickeln. Damit untersuchen die Forscher ein Spannungsfeld von historischer Tiefe, das zugleich von aktueller Bedeutung für die globalen Wandlungsprozesse unserer Zeit ist.

Die rund achtzig Forschungsprojekte des Exzellenzclusters sind in den folgenden vier Forschungsbereichen organisiert: „Regierungskunst & Verwaltung“, „Öffentlichkeit & Medien“, „Wissenssysteme“ und „Geschichte & Kulturerbe“. Überdies wurden fünf Lehrstühle eingerichtet, darunter die bundesweit erste Professur für globale Kunstgeschichte, zwei Start-up-Professuren sowie mehrere Nachwuchsforschergruppen. Zur Ausbildung und Förderung von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern bietet der Cluster den englischsprachigen Masterstudiengang „Transcultural Studies“ sowie das Graduiertenprogramm für Transkulturelle Studien an. Insgesamt promovieren am Cluster mehr als 100 Nachwuchswissenschaftler.

Der Cluster wurde 2007 im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gegründet und war 2012 erneut in der Exzellenzinitiative erfolgreich. Mittelfristig wird der Forscherverbund im Heidelberger Centrum für Transkulturelle Studien (HCTS) aufgehen, das im April 2014 eröffnet wurde. Zu den internationalen Partnern gehören die Chicago University, Oslo University, Universität Zürich, Jawaharlal Nehru University und Kyoto University.

[www.asia-europe.uni-heidelberg.de](http://www.asia-europe.uni-heidelberg.de)

**„Ein geschärftes  
Verständnis von  
Transit hilft uns, auch  
gegenwärtige  
Transitphänomene  
etwa infolge  
einer Flucht vor Krieg  
und Verfolgung  
besser zu verstehen.“**

# ARBEIT 4.0

ARBEIT 4.0

# ENTGRENZTES LEBEN

KARLHEINZ SONNTAG

Die Dynamik der Rahmenbedingungen menschlicher Arbeit, etwa der Digitalisierung und des demographischen Wandels, ist hoch. Gleichzeitig verschwimmen in zunehmendem Maße die Grenzen zwischen Arbeit und Privatleben. Welche Folgen hat das für unsere psychische und physische Gesundheit? Und wie wird unsere Leistungsfähigkeit hiervon beeinflusst? Arbeitspsychologen der Universität Heidelberg nehmen sich dieser noch wenig erforschten Fragen an. Sie untersuchen potenziell gesundheitsgefährdende Stressfaktoren und erproben Maßnahmen, die dabei helfen, unterstützende Ressourcen aufzubauen und den Umgang mit der digitalen Technologie zu verbessern.

# W

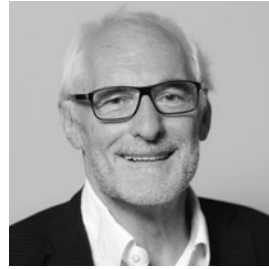
Wie sieht sie aus – die beste aller (Arbeits-)Welten von morgen? In Szenarien kreieren Zukunftsvorhersager neue Arbeitsstile vom Typ „corporate highflyers“, „digital bohème“ oder „loyale Störer“. Der „future leader“ versteht sich als „life coach“ mit losem „Commitment“ dem Unternehmen gegenüber; Arbeitsalltag und Alltagsräume sehen sich einer „Evolution“ ausgesetzt; aus Büros werden „Manufakturen des Wissens“ und „Wohlfühlkankstellen“. „Chief innovation evangelists“ beraten Organisationen auf dem Weg zur digitalen Transformation.

Dieser forsch-kreative Erguss aus Visionen, Anglizismen und plakativen Überhöhungen bei der Beschreibung zukünftiger Arbeitswelten soll hier nicht weiter verfolgt werden. Zurück zur Realität und zu den Fakten: Unstrittig ist, Veränderungen in der Arbeitswelt nehmen zu und haben immer stärkere Folgen sowohl für die Organisationen als auch für ihre Mitglieder. Insbesondere das klassische Verständnis von Arbeit hinsichtlich Raum, Zeit und Struktur unterliegt einem offenkundigen Wandel: Neue Arbeitsformen zeichnen sich aus durch hohe Flexibilität, flache Hierarchien, häufig wechselnde Arbeitsorte, fragmentierte Arbeitsstrukturen, variable Tätigkeitsmuster, erhöhte Eigenverantwortung sowie Entgrenzung von Arbeit und Freizeit gestützt durch innovative, mehr oder minder „smarte“ IT-Anwendungen.

## Vierte industrielle Revolution

Eine konsequente Umsetzung von IT-Anwendungen findet sich aktuell in der „Industrie 4.0“ – einer vermeintlich vierten industriellen Revolution. Dieses Vorhaben, das Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung ist, soll die Informatisierung klassischer Industriebereiche und Dienstleistungen vorantreiben und verbesserte Wertschöpfungsprozesse ermöglichen, indem weltweit vernetzte „cyber-physical-systems“ entwickelt werden. Dies sind komplexe Systeme, die softwaretechnische Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen verbinden und die über eine Dateninfrastruktur wie das Internet kommunizieren. Ihr Einsatzbereich sind beispielsweise Industrieanlagen, die sich hoch dynamisch an die jeweiligen Produktionsanfordernisse und Kundenwünsche anpassen können.

Eine große Herausforderung bei der Realisierung von „Industrie 4.0“ wird nach Ansicht von Experten aus



**PROF. DR. KARLHEINZ SONNTAG** ist seit 1993 Professor für Arbeits- und Organisationspsychologie an der Universität Heidelberg. Zuvor forschte er an der LMU München und der Universität Kassel und war als Gastprofessor an der Universität Bern (1999), der Wirtschaftsuniversität Wien (2005) und der Université de Fribourg (2007) tätig. Als Prorektor für Qualitätsentwicklung an der Universität Heidelberg implementierte er von 2009 bis 2013 das Qualitätsmanagement-System HeiQuality. Die Forschungsschwerpunkte des Arbeitspsychologen liegen unter anderem in der humanen Gestaltung digitalisierter Arbeitswelten, der Potenzialanalyse älterer Erwerbstätiger, dem Gesundheitsschutz, der Work-Life-Balance und der Personalentwicklung.

Kontakt: [karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de](mailto:karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de)

Wirtschaft und Wissenschaft darin liegen, eine menschenzentrierte, soziotechnische Gestaltung der neuen Arbeitssysteme zu gewährleisten. So sollen sich Fach- und Führungskräfte dank intelligenter Assistenzsysteme auf die kreativen, wertschöpfenden Tätigkeiten konzentrieren können und von Routineaufgaben entlastet werden. Erfahrungswissen der Mitarbeiter und deren Reflexions- und Anpassungsfähigkeit gepaart mit maschineller Präzision und Geschwindigkeit lassen die Konzepte einer Arbeit 4.0 effizient werden – vorausgesetzt, entsprechende Kompetenz und gesundheitsförderliche Maßnahmen der Arbeitsgestaltung und Personalentwicklung werden erprobt und nachhaltig genutzt.

## Alternde Erwerbstätige

Die Digitalisierung der Arbeitswelt mit ihren erheblichen Veränderungspotenzialen trifft auf einen demographischen Wandel, infolge dessen die Bevölkerung im Erwerbsalter zunehmend schrumpft und altert. Betrug nach Angaben des Statistischen Bundesamts die Zahl der potenziell Erwerbstätigen (20 bis 65 Jahre) 2013 noch circa 50 Millionen Menschen, werden es 2060 nur noch 34 bis 38 Millionen Menschen sein. Hauptgrund hierfür ist, dass die Generation der Babyboomer, also der in den 1950er- und 1960er-Jahren Geborenen, zwischen 2015 und 2030 aus dem Erwerbsleben ausscheidet. Dank der aktuellen Migrationsströme schrumpft Deutschland zwar nicht in dem Maße, wie in vorangegangenen Bevölkerungsprognosen angenommen – inwieweit dies zu einer Entspannung der Situation führt, bleibt allerdings abzuwarten.

Gleichzeitig ist ein deutlicher Anstieg der Lebenserwartung aufgrund verbesserter medizinischer Versorgung, Ernährung und Wohnsituation sowie verbesserter Arbeitsbedingungen zu erwarten. So prognostiziert die 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes bis zum Jahr 2060 eine Zunahme der Lebenserwartung bei Männern von 77,7 (Stand 2012) auf 84,4 bis 86,7 Jahre und bei Frauen von 82,8 auf 88,8 bis 90,4 Jahre. Der sogenannte Altenquotient – das Verhältnis der älteren Bevölkerung zur Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter – wird sich zwischen 2008 und 2060 nahezu verdoppeln (von 34 zu hundert auf 67 zu hundert). Diese Verschiebungen der Altersstruktur bewirken, dass der Bevölkerung im Erwerbsalter immer mehr Ältere gegenüberstehen werden.

## Psychische Belastungen am Arbeitsplatz

Die Alterung der potenziell Erwerbstätigen bei gleichzeitig zunehmender Informatisierung der Arbeitswelt wird zur entscheidenden Herausforderung – nicht nur für den Arbeitsmarkt und die Gesellschaft, sondern vor allem für die Betroffenen selbst, deren Arbeitsfähigkeit und -bereitschaft, deren Gesundheit und Lebenssituation. Die arbeitspsychologische Forschung an der Universität Heidelberg

stellt auf diesem Gebiet ihre Erkenntnisse in den Dienst der Anwendung, um Gesundheits-, Qualifikations- und Motivationsrisiken zu erkennen und die in der Forschung vielfach bestätigten Potenziale älterer Erwerbstätiger zu nutzen und zu fördern.

Psychische Belastungen in der dynamischen Arbeitswelt meint vor allem Zeitdruck, Arbeitsintensität und wachsende Verantwortung. Auch störende Unterbrechungen und Multitasking sind potenzielle Stressoren für Beschäftigte. Hinzu kommt, dass eine ständige Erreichbarkeit per Telefon oder E-Mail erwartet wird – auch außerhalb der regulären Arbeitszeit –, mit der vor allem Führungskräfte zu kämpfen haben.

Um potenzielle Belastungsfaktoren objektiv und systematisch erfassen sowie bewerten zu können, haben wir in mehrjährigen Forschungsarbeiten zusammen mit Fachkräften aus der Praxis das Analyseverfahren „Gefährdungsbeurteilung psychischer Belastungen“ (GPB) entwickelt. Geschulte Analyseteams, zusammengesetzt aus Experten des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, Vorgesetzten und Betriebsräten, beurteilen im Rahmen von Arbeitsplatzbegehungen nicht Einzelpersonen, sondern Tätigkeiten, Arbeitsinhalte und -bedingungen. Betrachtet werden dabei vor allem Faktoren, die in der internationalen Forschung immer wieder als potenzielle Stressoren identifiziert worden sind. Hierzu zählen Arbeitskomplexität, Handlungsspielraum, Variabilität, Zeitspielraum, Verantwortungsumfang, Arbeitsunterbrechungen, Konzentrations- und Kooperationsanforderungen, Kundenorientierung sowie Emotionsregulation. Die Analyseteams bewerten, inwieweit diese Einflussfaktoren zu kritischen Belastungskombinationen führen können – beispielsweise hohe Konzentrationserfordernisse und häufige Arbeitsunterbrechungen oder geringer Zeitspielraum bei ausgeprägter Kundenorientierung. Auf Basis der jeweiligen Befunde ermöglicht es das Verfahren schließlich, gemeinsam mit den Betroffenen Maßnahmen abzuleiten, um gesundheitliche Beeinträchtigungen zu vermeiden. Aktuelle normative und gesetzliche Regelungen zum Gesundheitsschutz wie die „Gemeinsame deutsche Arbeitsschutzstrategie“ oder das Arbeitsschutzgesetz führen dazu, dass die von den Heidelberger Arbeitspsychologen entwickelte Gefährdungsbeurteilung bundesweit eine erhöhte Nachfrage erfährt.

#### **Harmonisierung von Arbeit und Privatleben**

Wenn Arbeit zeitlich und örtlich immer flexibler wird – gestützt durch omnipräsenten digitalen IT-Support –, beeinflusst dies das Verhältnis von Arbeit und Privatleben in erheblichem Maße. Erschöpfung und Stresserleben der Beschäftigten sind die Folge, so die zentralen Befunde eines groß angelegten Forschungsprojektes zur Work-Life-Balance, das wir in Kooperation mit Organisationen aus der Industrie und dem öffentlichen Dienst durchgeführt haben. Obgleich

„Das klassische Verständnis von Arbeit hinsichtlich Raum, Zeit und Struktur unterliegt einem offenkundigen Wandel.“

# „Die Alterung der Erwerbstätigen bei gleichzeitig zunehmender Digitalisierung der Arbeitswelt wird zur entscheidenden Herausforderung.“

viele Beschäftigte das Bedürfnis nach einer deutlichen Trennung von Arbeit und Privatleben verspüren, schätzen sie die Möglichkeiten einer solchen Trennung in ihren Organisationen als vergleichsweise gering ein. Diese erlebte Diskrepanz führt zu Motivationsverlusten und stellt eine Gefahr für psychische Gesundheit und Wohlbefinden dar. Gelingt es Organisationen hingegen, Arbeitsinhalt und -rhythmus in der digitalisierten Arbeitswelt mit dem Bedürfnis nach Trennung der Lebensbereiche in Einklang zu bringen, reduziert sich deutlich das Auftreten von Erschöpfungssymptomen und die Arbeitszufriedenheit verbessert sich signifikant.

Die Ergebnisse der Work-Life-Balance-Studie führten zu bemerkenswerten personalpolitischen Konsequenzen: So verabschiedet der Vorstand eines global aufgestellten schwäbischen Automobilbauers, der an unserer Studie teilgenommen hatte, verbindliche konzernübergreifende Führungsgrundsätze zur Harmonisierung der Lebensbereiche – festgeschrieben in den vier Handlungsfeldern „Grenzen beachten“, „Erholung bewusst einsetzen“, „Abschalten können“ sowie „Arbeit und Privates vereinbaren“.

Des Weiteren wurde flächendeckend der geschäftliche E-Mail-Verkehr während der Urlaubszeit eingestellt, indem ein „folgenschwerer“ Abwesenheitsassistent geschaltet wurde. Neben den üblichen Hinweisen auf urlaubsbedingte Abwesenheit und eine Stellvertretung weist dieser explizit darauf hin, dass alle in der betreffenden Zeit eingehenden E-Mails gelöscht werden. Somit kann sich der im Urlaub befindliche Empfänger ohne Störung erholen und das Abarbeiten angesammlter E-Mails nach dem Urlaub entfällt.

Eine weitere Intervention bestand darin, selbstregulative Fähigkeiten zu trainieren, die eine bessere Grenzziehung zwischen Arbeit, Freizeit und Familie ermöglichen. Das Training richtet sich an Nachwuchsführungskräfte, die sich in der „Rush Hour“ ihres Lebens befinden, also gleichzeitig mit Karriere und Familienplanung beschäftigt sind. Diese von den Heidelberger Arbeitspsychologen entwickelte „Boundary Management Intervention“ beinhaltet Module und Techniken, die dabei helfen sollen, die aktuelle Lebenssituation und mögliche Rollenkonflikte zu reflektieren und gedanklich von der Arbeit abzuschalten. Weitere Strategieübungen dienen dazu, die Erholung zu fördern und die Lebensbereiche besser miteinander abzustimmen. Sorgfältige Evaluationen belegen die Wirksamkeit des neuen Trainings. Die Teilnehmer zeigten sich zufriedener mit ihrer Work-Life-Balance und waren weniger erschöpft. Sie berichteten eine bessere Schlafqualität, ein konsequenteres Abschalten von der Arbeit und insgesamt eine Harmonisierung der Lebensbereiche.

## Die moderne Arbeitswelt

Roboter machen Menschen nicht überflüssig, beeinflussen aber durchaus ihre Tätigkeiten, sorgen für veränderte Anforderungen und kreieren neue Berufsbilder. Über die technischen Automatisierungseffekte des digitalen Wandels liegen unterschiedliche wissenschaftliche Auffassungen vor. Eine Studie und Befragung von Robotik-Experten in den USA etwa ergab, dass 47 Prozent der Beschäftigten in Berufen arbeiten, die in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren sehr wahrscheinlich automatisiert werden. Das Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung hat das Design dieser Studie auf Deutschland übertragen und kommt zu dem Ergebnis, dass hierzulande circa 42 Prozent der Beschäftigten betroffen wären. Allerdings gehen die Mannheimer Wirtschaftsforscher davon aus, dass weniger ganze Berufe als vielmehr Tätigkeitsbereiche automatisiert werden – und dass nicht alle Beschäftigten der gleichen Berufsgruppe dieselben Tätigkeiten ausüben. Bei einer entsprechenden modifizierten Analyse weisen lediglich neun Prozent der Arbeitsplätze in den USA Tätigkeitsprofile auf, die mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit von Computern übernommen werden – in Deutschland sind es zwölf Prozent. Betroffene sind dabei vor allem Geringqualifizierte.

WORK 4.0

# LIFE WITHOUT BOUNDARIES

KARLHEINZ SONNTAG

Our workplace is changing: Employees are increasingly expected to be flexible, adaptable and able to keep up with the ongoing digitisation of their work. In particular, classic concepts of the space, time and structure of work are undergoing obvious change: New forms of work are characterised by a great deal of flexibility, flat hierarchies, frequently changing work locations, fragmented work structures, variable patterns of activity, increased personal responsibility and blurred boundaries between work and leisure, supported by more or less ‘smart’ IT applications. This development coincides with demographic changes that are marked by a negative growth and increasing average age of the working population.

Little research has been conducted regarding the impact of these changes on physical and psychological health and on employee performance. Researchers of Heidelberg University’s Department of Industrial and Organisational Psychology want to close this gap. They investigate potentially harmful stressors and have developed a special method of analysis that allows them to objectively and systematically record and evaluate work-related stress-inducing factors. The researchers want to use their findings to develop practical solutions that will contribute to a mode of working that keeps workers healthy. To this end, they collaborate with their target group to design measures that help avoid adverse effects on workers’ health, strengthen individual resources and develop self-regulation abilities that enable workers to better distinguish between work, leisure and family time. With this research, industrial psychologists at Heidelberg University are making a direct contribution to the design of healthy and safe workplaces for tomorrow. ●

PROF. DR KARLHEINZ SONNTAG has held the Chair of Industrial and Organisational Psychology at Heidelberg University since 1993. He previously conducted research at LMU Munich and the University of Kassel and worked as a visiting professor at the University of Bern (1999), Vienna University of Economics and Business (2005) and the Université de Fribourg (2007). As Vice-President Quality Development at Heidelberg University, he supervised the implementation of the HeiQuality quality management system between 2009 and 2013. Prof. Sonntag's research interests include the human-centred design of digitised workplaces, the potential analysis of older workforce members, health protection, work-life balance and personnel development.

Contact: karlheinz.sonntag@psychologie.uni-heidelberg.de

**“The ageing of the working population, coupled with the increasing digitisation of the workplace, has become a vital challenge.”**



Arbeitstätigkeiten, die infolge der Digitalisierung re-strukturiert werden oder neu entstehen, sind anspruchsvoller und zeichnen sich durch deutlich veränderte Anforderungsprofile aus. Beschäftigte müssen in Zukunft immer häufiger in der Lage sein, vernetzte Anlagen und Systeme zu beherrschen und zu optimieren. Die Aufgaben werden insgesamt komplexer, kognitive Anforderungen steigen und kommunikative Fähigkeiten sind verstärkt gefordert. Indem Arbeitsvorgänge zunehmend virtualisiert werden, können gleichzeitig immer weniger eigene reale Erfahrungen gemacht werden. Auch die Fähigkeit zur Selbstorganisation wird wichtiger, Beschäftigte agieren zunehmend eigenverantwortlich.

#### **Arbeit 4.0: Gesund gestalten, kompetent bewältigen**

In einer digitalisierten und dynamischen Arbeitswelt mit zunehmend älteren Erwerbstätigen sind Gesundheit und Kompetenz der Beschäftigten die entscheidenden Ressourcen. Erwerbstätige müssen durch präventive Konzepte darauf vorbereitet werden, ihre Gesundheit und berufliche Leistungsfähigkeit zu erhalten und den Umgang mit neuen Technologien zu meistern. Ende vergangenen Jahres wurden die Heidelberger Arbeitsforscher vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit der Entwicklung derartiger Konzepte beauftragt. Hierzu fördert das BMBF mit 1,7 Millionen Euro das auf dreieinhalb Jahre angelegte Projekt „Maßnahmen und Empfehlungen für die gesunde Arbeit von morgen“ (MEgA). Aufgabe der Wissenschaftler ist es, neben eigener Forschung die Entwicklungsarbeiten von bundesweit dreißig Verbundprojekten (unter Beteiligung von Unternehmen, Hochschulen, Forschungsinstituten sowie weiteren Akteuren im Arbeits- und Gesundheitsschutz) zu begleiten.

Auf der Grundlage unserer bisherigen Forschungen und der Auswertung nationaler und internationaler Studien analysieren wir im Rahmen von MEgA wichtige Trends und Entwicklungen der modernen Arbeitswelt. Im Zentrum stehen dabei Themenfelder wie gesunde Führung, präventive Arbeitsgestaltung, Nutzung gesundheitsfördernder Assistenzsysteme und Roboter sowie smarte Technologien. Durch Interviews und repräsentative Befragungen bei Personalverantwortlichen erfassen wir konkrete Bedarfe in diesen Feldern. Ziel ist es, aufbauend auf unseren Befunden praktisch anwendbare Lösungen zu entwickeln, die zu einem gesund erhaltenden Arbeitsumfeld beitragen, das die Ressourcen der Fach- und Führungskräfte bewahrt. Schließlich werden die von uns entwickelten Maßnahmen im Arbeitsalltag erprobt und umgesetzt. Über Netzwerke und eine interaktive Kommunikationsplattform ([www.gesundearbeitmega.de](http://www.gesundearbeitmega.de)) stellen wir darüber hinaus einen schnelleren Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Sozialpartnern sicher. Damit tragen wir konkret zur Gestaltung gesunder und sicherer Arbeitswelten von morgen bei. ●

„Viele Beschäftigte verspüren das Bedürfnis nach einer deutlichen Trennung von Arbeit und Privatleben. Häufig jedoch scheint dies nicht möglich.“



PARASITOLOGIE  
**RUHE VOR DEM STURM**  
NEUE ANSÄTZE IM KAMPF GEGEN MALARIA  
FRIEDRICH FRISCHKNECHT

42



UMWELTPHYSIK  
**GIFTIG**  
LUFTVERSCHMUTZUNG IN DEN STÄDTEN  
DENIS PÖHLER & ULRICH PLATT

50



PHYSIKALISCHE CHEMIE  
**VORHANG AUF – VORHANG ZU**  
DAS SCHAUSPIEL DER MOLEKÜLE  
MARCUS MOTZKUS

60



MATHEMATIK  
**FREIE BAHN**  
KOMPLEXITÄT BEHERRSCHEN  
EKATERINA KOSTINA

68

# VORSPRUNG



**RUHE  
VOR**

**DEM  
STURM**

RUHE VOR DEM STURM

# NEUE ANSÄTZE IM KAMPF GEGEN MALARIA

FRIEDRICH FRISCHKNECHT

Jährlich erkranken in den Tropen und Subtropen über 250 Millionen Menschen an Malaria, mehr als 500.000 sterben daran, zumeist Kinder. Übertragen wird das gefährliche „Wechselfieber“ von Stechmücken, die den Malaria-Erreger in sich tragen – einen einzelligen Parasiten, der einen komplexen Lebenszyklus durchläuft. Heidelberger Wissenschaftler haben mit neuen Methoden auffällige Pausen während des verhängnisvollen parasitären Eroberungsfeldzuges des Erregers erkannt. Möglicherweise finden sich in den Phasen der Ruhe vor dem Sturm neue molekulare Ansätze, um die uralte Menschheitsgeißel wirkungsvoll zu bekämpfen.

# E

Einst war die Malaria fast überall auf der Welt verbreitet. Selbst in der Region rund um Heidelberg trat das „Sumpf- oder Wechselfieber“ auf. Erst im 19. Jahrhundert gelang es in Deutschland, die von Stechmücken übertragene Krankheit zurückzudrängen – eine Folge der Zerstörung ihrer Lebensräume im Zuge der Begradigung des Rheins. Bis in die 1970er-Jahre hinein dauerte es, die Malaria aus Europa zu vertreiben.

# „Insgesamt sind weit über hundert Spezies von Malaria-Erregern bekannt. Sie befallen Vögel, Nagetiere, Echsen und Affen. Fünf Erregertypen rufen beim Menschen Malaria hervor.“

Die Erreger der gefährlichen Infektionskrankheit – einzelne Parasiten der Gattung Plasmodium – gelangen beim Stich einer weiblichen Anopheles-Stechmücke in die Haut des Menschen. Die Parasiten bewegen sich durch das Unterhautgewebe fort und suchen nach einem Blutgefäß, in welches sie eindringen können. Ist ihnen das gelungen, lassen sie sich vom Blutstrom im Körper verteilen. In der Leber schließlich halten sie an und dringen gezielt in die Zellen des Organs ein, um sich in ihnen zu vermehren. Die Nachkommen – neu entstandene Parasitenformen – treten aus den Leberzellen aus und dringen anschließend in rote Blutkörperchen ein. Erst dieser Befall löst die Symptome der Krankheit aus. Die nächste Mücke, die den infizierten Menschen sticht, nimmt mit dem Blut wieder Parasiten auf. Der Kreislauf beginnt aufs Neue.

Im Laufe ihres komplexen Lebenszyklus verändern die Parasiten mehrfach Form und Verhalten. Unsere Arbeitsgruppe in Heidelberg untersucht seit nunmehr über zehn Jahren, wie die Parasiten im Körper der Stechmücke heranreifen. Hierzu verfolgen wir, wie sich die Parasiten in

großen Zysten entwickeln, die sich an der Wand des Mückenmagens befinden. Bis zu tausend Erreger können im Innern einer solchen Zyste entstehen und aus ihr hervorbrechen. Im Zuge unserer Arbeiten konnten wir mehrere Proteine in den Membranen der Parasiten identifizieren, die eine entscheidende Rolle bei diesen Vorgängen spielen. Doch welche genaue Funktion haben diese Proteine? Um mehr darüber zu erfahren, stellen wir mit genetischen Methoden Parasiten her, denen diese wichtigen Proteine fehlen oder deren Aufbau verändert ist. Wir haben beispielsweise fluoreszierende Farbstoffe in diese Proteine eingeschleust, sodass die Membranen der Parasiten im Mikroskop leuchten und wir ihre Entwicklung beobachten können.

Sobald die Reifung der Parasiten im Innern der Zyste abgeschlossen ist, brechen sie aus ihr hervor und gelangen in den „Blutkreislauf“ der Mücke. Wir konnten erstmals verfolgen, in welchen einzelnen Schritten das geschieht: Zunächst liegen die Parasiten in der Zyste eng beieinander und sind weitgehend regungslos, doch dann beginnen sie,

sich zu bewegen. Aus der großen zirkulierenden parasitären Masse im Innern der Zyste treten einzelne Parasiten aus oder sie werden zu Hunderten explosionsartig aus der Zyste herausgeschleudert.

### Auffälliges Verharren

Aus der Zyste befreit, treiben die Parasiten im Körper der Mücke, bis sie in die Speicheldrüsen eindringen. Während unserer Forschungsarbeiten konnten wir ein Protein identifizieren, ohne das die Parasiten die Zyste nicht verlassen und nicht in die Speicheldrüsen eindringen können. Auf ihrem Weg in die Speicheldrüse scheinen sich die Parasiten nochmals aktiv zu bewegen, dann aber gehen sie erneut in eine zunächst regungslose Phase über. In den Speicheldrüsen können sich mehrere Tausend Parasiten ansammeln, beim Stich der Mücke gelangen aber meist nur zehn bis hundert Parasiten in die Haut des Menschen. Bislang verstehen wir nicht, warum nur eine so kleine Anzahl von Parasiten übertragen wird.

In Untersuchungen mit Mäusen ist es uns gelungen, den Weg der Parasiten in den Wirtsorganismus zu filmen. Dazu markierten wir die Parasiten mit fluoreszierenden Proteinen und beobachteten mithilfe spezieller Mikroskope, wie die Mücke ihren Stechrüssel in die Haut der Mäuse einführt und sich danach regelrecht durch das Gewebe kaut. Mit ihrem Ober- und Unterkiefer zerstört sie dabei kleine Blutgefäße, woraufhin es zu Blutungen im Unterhautgewebe kommt. Damit dies nicht sofort zu Schmerzen führt, die auf die Gefahr aufmerksam machen würden, spuckt die Mücke Speichel in die von ihr verursachte Wunde: Er enthält Substanzen, die kurzfristig schmerzlindernd wirken. Zudem hemmen weitere im Speichel enthaltene Substanzen die Blutgerinnung – schließlich will die Mücke das Blut ihres Opfers trinken. Mit dem Fluss des Speichels gelangen auch die Parasiten in die Haut des Menschen. Dort angekommen, haben es die Parasiten plötzlich sehr eilig. Sehr schnell bewegen sie sich im Gewebe fort – rund zehn Mal schneller als die ihnen nachstellenden Fresszellen des menschlichen Immunsystems. Auch von Zellen, die ihnen im Weg stehen, lassen sich die Parasiten nicht aufhalten: Sie rasen einfach durch sie hindurch. Von den Parasiten, die während des Stichs übertragen werden, schafft es etwa ein Drittel, in ein Blutgefäß einzudringen; den anderen geht zuvor die Energie aus, wieder andere wandern – wohl versehentlich – in ein Lymphgefäß ein.

Doch wie finden die Parasiten die Blutgefäße? Auch das haben wir in Heidelberg erforscht. Die Parasiten, die von der Mücke übertragen werden, sind circa zehn Mikrometer lang, einen Mikrometer breit und leicht gekrümmt. Isolierte Parasiten laufen wegen dieser Krümmung immer im Kreis. Das erleichtert es uns enorm, sie mit dem Mikroskop zu beobachten – sie können aus dem gewählten Bildausschnitt nicht davonrennen. Die

auffällige Krümmung der Parasiten ist aber noch aus einem ganz anderen Grund bemerkenswert: Sie entspricht ungefähr der Krümmung der kleinsten Blutgefäße. Wir denken, dass dies kein Zufall ist, sondern sich im Laufe der Evolution so entwickelt hat: Ihre charakteristische Krümmung könnte es den Parasiten ermöglichen, passende Blutgefäße zu finden, sich an sie anzuschmiegen und in sie einzudringen.

Um diese Hypothese zu prüfen, haben wir zusammen mit Wissenschaftlern des Physikalisch-Chemischen Instituts (PIC) der Universität Heidelberg mikroskopisch kleine Labyrinth mit unterschiedlich dicken Säulen hergestellt. Gibt man nun Parasiten in die Labyrinth, die mit Hunderten solcher Säulen verschiedener Dicke bestückt sind, lässt sich tatsächlich beobachten, dass sich die Parasiten am liebsten um Säulen mit derjenigen Krümmung schlängeln, die ihrer eigenen Krümmung am ähnlichsten ist. Wir wollen diese Beobachtung nun im lebenden Organismus mittels Untersuchungen an Mäusen überprüfen. Dazu erzeugen wir zurzeit mit gentechnischen Methoden Parasiten, die unterschiedliche Krümmungen aufweisen.

### Kräfte sammeln

Bevor die Parasiten in die Blutgefäße eindringen, scheinen manche wieder eine Pause einzulegen: Womöglich stellt die stabile Wand der Blutgefäße doch eine Barriere dar, welche die Parasiten nicht ganz so einfach, sondern nur mit geballter Kraft überwinden können. Gemeinsam mit Wissenschaftlern des Instituts für Theoretische Physik der Universität Heidelberg untersuchen wir, wie groß die Kräfte sind, die die Parasiten hierzu aufbringen müssen. Dazu setzen wir zwei unterschiedliche Methoden ein. Zum einen untersuchen wir die Kräfte, die Parasiten auf winzige Kügelchen ausüben. Die Kügelchen werden dafür im Fokus eines Laserstrahls gefangen und präzise auf den Parasiten platziert. Anhand der Auslenkung der Kügelchen lässt sich dann die Kraft berechnen, mit welcher der Parasit an ihnen zieht. Dies erlaubt es uns, auf den Mechanismus der Kraftübertragung rückzuschließen. Zum anderen bestimmen wir die Kräfte, mit denen der Parasit am Boden zieht: Dazu setzen wir die Parasiten auf flexible Gele, in denen sehr kleine leuchtende Kügelchen sitzen, und messen deren Auslenkung, sobald sich der Parasit bewegt.

Derartige Kraftmessungen erfolgen zusätzlich mit Parasiten, die genetisch verändert wurden. Während dieser Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Kräfte der Parasiten massiv beeinträchtigt sind, wenn nur drei Aminosäuren-Bausteine eines bestimmten Proteins verändert sind. Die Parasiten sind aufgrund dieser Veränderung derart geschwächt, dass sie sich nicht wie üblich fortbewegen können. Es handelt sich dabei um ein Protein, das imstande ist, ein anderes Protein namens „Aktin“ zu binden. Aktin ist wichtig für die Funktion der Muskel-



**PROF. DR. FRIEDRICH FRISCHKNECHT** studierte Biochemie an der Freien Universität Berlin und promovierte dort zu Arbeiten an Pockenviren, die er am Europäischen Molekularbiologischen Laboratorium (EMBL) in Heidelberg durchführte. Es folgte ein vierjähriger Aufenthalt am Institut Pasteur in Paris, an dem er seine Forschungen zur Malaria aufnahm. Von 2005 an baute Frischknecht in der Universitätsklinik Heidelberg seine Arbeitsgruppe auf, seit 2014 ist er Professor für Integrative Parasitologie am Zentrum für Infektiologie der Medizinischen Fakultät Heidelberg; darüber hinaus ist er Mitglied des Exzellenzclusters CellNetworks. Die im Text beschriebenen Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit den Doktoranden Mirko Singer, Benjamin Spreng, Dennis Klug, Johanna Kratzer, Mendi Muthinja, Catherine Moreau und Katharina Quadt, dem Postdoc Dr. Ross Douglas sowie Prof. Dr. Joachim Spatz vom Physikalisch-Chemischen Institut, Prof. Dr. Ulrich Schwarz vom Institut für Theoretische Physik (beide Universität Heidelberg) und Prof. Dr. Rogerio Amino vom Pariser Institut Pasteur.

Kontakt: [freddy.frischknecht@med.uni-heidelberg.de](mailto:freddy.frischknecht@med.uni-heidelberg.de)

# „Wenn wir die Bewegungsfähigkeit der Parasiten einschränken, können wir womöglich auch verhindern, dass sie ihren Lebenszyklus fortsetzen und Malaria auslösen.“

zellen des Menschen – und ebenso für die Bewegung der Parasiten. Aktin scheint aber bei den Parasiten anders zu funktionieren: Im Unterschied zu seiner Organisation in menschlichen Muskelzellen bildet es in den einzelligen Parasiten nur äußerst kleine und zudem instabile „Mikrofilamente“, winzige längs ausgerichtete Fasern. Wie es zu diesem Unterschied kommt, untersuchen wir derzeit. Wir hoffen, dabei auf eine „Achillesferse“ des Parasiten zu treffen. Denn wenn wir die Bewegung der Parasiten einschränken können, dann schaffen sie es nicht bis in das Blut, sie können sich im Organismus also nicht verbreiten und den Menschen krank machen.

## Ein Blick zurück

Wenn die Parasiten im Blut angekommen sind, reißt sie der Blutstrom mit durch den ganzen Körper. Früher gingen die Wissenschaftler davon aus, dass Parasiten ohne Zwischenstopp direkt nach dem Stich der Mücke in die Zellen des Blutes eindringen und unmittelbar die Symptome der Malaria auslösen. Doch die experimentellen Beobachtungen stimmten mit dieser Annahme nicht überein. Ein Beispiel ist ein – heute undenkbares – Experiment Anfang des 20. Jahrhunderts. Damals ließ man freiwillige Versuchsteilnehmer von vielen Mücken stechen und nahm den Probanden daraufhin zeitlich versetzt Blut ab, um es einer zweiten Gruppe von Freiwilligen zu injizieren. Es zeigte sich, dass zwar die erste, nicht aber die zweite Gruppe der Versuchsteilnehmer an Malaria erkrankte. Erst nach neun Tagen, so stellte sich heraus, ließ sich die Malaria von der ersten auf die zweite Gruppe übertragen. In der Zwischenzeit, das vermuteten die Wissenschaftler damals, verstecken sich die Parasiten irgendwo im Körper. Mitte des 20. Jahrhunderts zeigten dann Untersuchungen mit Tieren, wo sich die Parasiten zwischenzeitlich aufhalten und gleichsam ihre Kräfte vor dem Angriff sammeln: in der Leber. Dort nisten sich die Parasiten in den Zellen ein, vermehren sich in ihnen und verändern ihre Form so, dass sie wiederum in das Blutgefäßsystem abgegeben und rote Blutzellen befallen können. Erst dann macht sich die Malaria mit ihren typischen Krankheitszeichen bemerkbar.

Nachfolgende Untersuchungen zeigten, wie erstaunlich schnell sich die Parasiten in der Leber vermehren: Aus einem einzigen von der Mücke übertragenen Parasiten formen sich rund 20.000 komplett anders aussehende, nurmehr ein bis zwei Mikrometer kleine Parasiten. Ein einziger dieser winzigen Parasiten, der in das Blutgefäßsystem eintritt, reicht aus, um Malaria auszulösen. Bei einem infizierten Menschen können bis zu vierzig Prozent der roten Blutkörperchen von Parasiten befallen sein. Dann befinden sich in seinem Blut mehr als 10.000.000.000 Parasiten – dies entspricht ungefähr einem halben Kilogramm an parasitärer Masse. Doch schon ein Parasitenbefall von weniger als 0,1 Prozent der Blutzellen kann für den Menschen tödlich enden.



THE CALM BEFORE THE STORM

# NEW APPROACHES IN THE FIGHT AGAINST MALARIA

FRIEDRICH FRISCHKNECHT

Malaria parasites undergo a complex life cycle between their mosquito vectors and their vertebrate hosts. During their roundabout journey they need to be motile at several stages, but can also be sessile for long periods. To achieve these different tasks most efficiently, the parasite adopts many different shapes. My lab is particularly interested in the parasite stage transmitted by the mosquito. We study the development of this parasite in the mosquito gut, where hundreds of parasites are formed from a single progenitor in large cysts. In this way, we found and analysed a number of proteins that are important in this process and used time-lapse microscopy to discover how the parasite egresses from the cysts.

Once liberated from the cyst, the parasite needs to enter the salivary glands of the insect before being transmitted to its host. During my postdoctoral studies my colleague Rogerio Amino and I were able to film parasites making their way through the salivary glands, being spit out by the mosquito and migrating within the skin of mice. Intriguingly, these parasites can migrate through the dermal tissue at extremely high speed, literally outrunning the cells of our immune system. The parasites eventually force their way into blood capillaries to continue their journey to the liver, where they multiply for the first time inside the human body, changing into a different form that infects red blood cells.

We are now trying to understand how the parasite manages to achieve the rapid motility necessary for these first steps of infection. To this end, we generate transgenic parasites that either lack certain genes or express modified forms of them. But we also use biophysical methods, in collaboration with colleagues from the physics department, to measure forces that parasites can produce. Finally, we have generated transgenic parasites that arrest during their development in the liver to examine their potential as experimental vaccines. ●

**PROF. DR FRIEDRICH FRISCHKNECHT** studied biochemistry at Freie Universität Berlin and earned his doctorate with a thesis on smallpox viruses, which he researched at the European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg. He then spent four years at the Institut Pasteur in Paris, where he began his research on malaria. Starting in 2005, Frischknecht established his research group at Heidelberg University Hospital; in 2014 he became Professor of Integrative Parasitology at the Medical Faculty's Department of Infectious Diseases. Furthermore, he is member of Heidelberg's interdisciplinary research cluster CellNetworks. The research described in the text was carried out in collaboration with doctoral students Mirko Singer, Benjamin Spreng, Dennis Klug, Johanna Kratzer, Mendi Muthinja, Catherine Moreau and Katharina Quadt, as well as postdoc Dr Ross Douglas, Prof. Dr. Joachim Spatz of Heidelberg's Institute for Physical Chemistry, Prof. Dr. Ulrich Schwarz of Heidelberg's Institute for Theoretical Physics and Prof. Dr. Rogerio Amino of the Institut Pasteur, Paris.

Contact: [freddy.frischknecht@med.uni-heidelberg.de](mailto:freddy.frischknecht@med.uni-heidelberg.de)

**“If we can restrict the parasites’ motility, we can prevent them from continuing their life cycle and triggering malaria.”**

**„Bis zu vierzig Prozent der roten Blutkörperchen eines infizierten Menschen können von Malaria-Parasiten befallen sein. Dann befinden sich in seinem Blut mehr als 10.000.000.000 Parasiten – dies entspricht ungefähr einem halben Kilogramm an parasitärer Masse.“**

Solange der Parasit in der Leber verweilt, spüren die infizierten Personen keine Zeichen der Erkrankung. Auch dieses klinisch noch unauffällige „Leberstadium“ ist ein hochinteressantes und vielversprechendes Forschungsfeld. Es ist beispielsweise möglich, die Parasiten mittels Bestrahlung, Chemotherapie oder genetischer Manipulation so zu verändern, dass sie sich in der Leber nicht vollständig entwickeln und somit nicht in den Blutkreislauf gelangen können. Derart abgeschwächte Parasiten werden zurzeit weltweit als experimentelle Impfstoffe

getestet. Uns ist es kürzlich gelungen, mit einem gezielten Schnitt in das Erbgut des Parasiten nicht nur zwei oder drei, sondern über hundert seiner Gene auszuschalten. Das Ziel unserer künftigen Forschungsarbeiten ist es, zu prüfen, ob geschwächte Parasiten eingesetzt werden können, um gegen Malaria wirksam impfen zu können. ●

**GIFTLIG**

GIFTIG

# LUFTVERSCHMUTZUNG IN DEN STÄDTEN

DENIS PÖHLER & ULRICH PLATT

**Spätestens seit dem VW-Abgasskandal sind Stickoxid-Emissionen in den Fokus öffentlicher Debatten gerückt. Stickoxide sind sehr giftig und ihre Konzentration in den Städten gesundheitsgefährdend hoch – unter realen Bedingungen ließen sie sich bislang aber nur schwer messen. Heidelberger Umweltphysiker haben eine innovative Lösung für das Problem.**

# D

Die meisten Menschen in Industrienationen und Schwellenländern leben in urbanen Ballungsgebieten. Die Qualität der Luft wird in diesen dicht besiedelten Gegenden vor allem durch die Emissionen von Kraftfahrzeugen bestimmt. Hierzulande überwachen die Bundesländer und das Umweltbundesamt die Luftqualität mit circa 500 Messstationen. Einen negativen Einfluss auf die Luftqualität hat neben Feinstaub und Ozon ( $O_3$ ) vor allem Stickstoffdioxid ( $NO_2$ ). Laut Umweltbundesamt ist Stickstoffdioxid mittlerweile der „Schadstoff Nummer eins“ in Deutschland. Auch Stickstoffmonoxid ( $NO$ ) spielt eine Rolle; verglichen mit Stickstoffdioxid ist es aber weniger gesundheitsschädlich.  $NO_2$  und  $NO$  stehen in einem chemischen Gleichgewicht und werden in der Summe als Stickoxide ( $NO_x$ ) bezeichnet. Daher wird für die Emissionen  $NO_x$  und für die Luftqualität  $NO_2$  reglementiert.

## Charakteristik eines Schadstoffs

In hohen Konzentrationen ist Stickstoffdioxid rotbraun gefärbt und riecht stechend. In geringer Konzentration ist es unsichtbar, und sein Geruch ist kaum wahrnehmbar. Auswirkungen auf den Menschen infolge kurzfristiger hoher  $NO_2$ -Belastungen der Außenluft zeigen sich in einer Zunahme der Gesamtsterblichkeit, insbesondere aufgrund von Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Hauptsächlich betroffen sind Menschen mit Asthma oder chronischer Bronchitis. Bei kurzfristiger Exposition mit extrem hohen Konzentrationen von über 4.700 Mikrogramm pro Kubikmeter ( $\mu g/m^3$ ) ist mit einer verminderten Lungenfunktion zu rechnen, darüber hinaus mit Atemnot und Lungenödemen (Wasser in der Lunge). Die Atemwege und die Bindegewebe des Auges können bereits durch niedrige Konzentrationen (bis  $40 \mu g/m^3$ ) gereizt werden.

Von einer langfristigen  $NO_2$ -Belastung der Außenluft sind besonders Menschen betroffen, die an verkehrsreichen Straßen leben. Bei längerer Exposition mit zehn bis  $100 \mu g/m^3$  treten häufiger Erkrankungen der Atemwege wie Husten, Bronchitis und Verschlechterungen der Lungenfunktion auf, die chronisch werden können. Es liegen auch Anhaltspunkte für eine krebserregende Wirkung vor. Selbst wenn Menschen in ihrer Jugend nur geringen  $NO_2$ -Konzentrationen ausgesetzt waren, ist es aufgrund derzeitiger wissenschaftlicher Erkenntnisse

nicht auszuschließen, dass sich im Alter irreversible Lungenschäden entwickeln. Nach der EU-Gefahrenstoffkennzeichnung „EG 1272/2008“ wird  $NO_2$  deshalb als sehr giftig für den Menschen eingestuft.

Darüber hinaus verursacht Stickstoffdioxid sauren Regen und trägt zur Versauerung des Bodens bei, es behindert das Wachstum der Pflanzen und beschleunigt die Verwitterung von Naturstein, wovon viele Baudenkmäler betroffen sind.  $NO_2$  katalysiert auch die Bildung des gleichfalls sehr schädlichen Ozons, und es erzeugt indirekt Aerosolpartikel. Der Schadstoff Stickstoffdioxid muss deshalb immer in einem größeren Zusammenhang gesehen werden.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt zum Schutz von Mensch und Natur für die Stickstoffdioxid-Konzentration einen Jahresmittelgrenzwert von  $40 \mu g/m^3$  und einen Stundenmittelgrenzwert von  $200 \mu g/m^3$ . Die Grenzwerte der WHO sind europaweit in die Richtlinie „2008/50/EG“ übernommen worden. Zusätzlich wurde festgelegt, dass der Ein-Stunden-Grenzwert nicht öfter als 18 Mal im Kalenderjahr überschritten werden darf. Die Realität jedoch sieht anders aus: In Deutschland wurde der Jahresmittelgrenzwert für Stickstoffdioxid in den Jahren 2014 und 2015 an circa sechzig Prozent aller verkehrsnahen Messstationen überschritten – hierin zeigt sich ein flächendeckendes Problem.

## Das Problem der stationären Luftqualitätsmessung

Für zu hohe Emissionen von Stickoxid sind in den Städten vorwiegend der Verkehr und besonders dieselbetriebene Kraftfahrzeuge verantwortlich. Die Luftqualität eines Ortes wird dabei nicht allein vom Verkehrsaufkommen beeinflusst, sondern auch von der geographischen Lage, der Bebauung und den meteorologischen Bedingungen. Aus diesen vielfältigen Faktoren resultieren lokal große Schwankungen der  $NO_2$ -Konzentration. In den Städten wird die Schadstoffbelastung in der Regel aber nur stationär an ein bis zwei Messstationen erfasst. Das macht es kaum möglich, die Belastung für die gesamte Bevölkerung zu bestimmen. Ein weiterer Nachteil herkömmlicher, fest installierter Umweltmessstationen ist die Messtechnik selbst: Die  $NO_2$ -Konzentration wird nur indirekt mit Chemilumineszenz-Messgeräten (CLD) und Konvertern ermittelt – dadurch sind große systematische Messfehler bis zu fünfzig Prozent möglich. Zudem benötigen die Geräte regelmäßig teure und aufwendige Kalibrationen.

Ein kompaktes und mobiles, am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg entwickeltes „ICAD- $NO_x$ -Messinstrument“ macht es möglich, die Konzentration von Stickstoffdioxid unabhängig von stationären Messstationen präzise an beliebigen Orten zu bestimmen. Mit dem neuen, zur Patentierung eingereichten Gerät konnten bereits in vielen Städten zahlreiche Untersuchungen stattfinden.

Ziel unserer Immissionsmessungen ist es, den politischen Entscheidern kurzfristig verlässliche und realitätsnahe Messdaten zu liefern, damit nötige und zielführende Maßnahmen zur Reduktion von Schadstoffen in den Städten erfolgen können. Im Auftrag von Städten und Umweltorganisationen, etwa der Deutschen Umwelthilfe und Greenpeace, aber auch im Auftrag des Deutschen Bundestags wurde hierzu in den vergangenen Monaten an verschiedensten Orten die Schadstoffbelastung gemessen und quantifiziert:

- In bisher 16 deutschen Städten erfolgten Untersuchungen an über 200 Messorten. Damit ließ sich eine Übersicht der Schadstoffbelastung in den jeweiligen Städten erzielen.
- Mit mobilen Fahrradmessungen wurde die Belastung für Fahrradfahrer genau bestimmt.
- Die Schadstoffwerte an Kindergärten und Schulen wurde näher quantifiziert, um die flächendeckende Belastung dieser besonders gefährdeten Bevölkerungsgruppe zu untersuchen.

Insgesamt bilden unsere Untersuchungen die aktuelle städtische NO<sub>2</sub>-Belastung wesentlich genauer ab als die wenigen fest installierten Umweltmessstationen.

#### Fingerabdruck der Moleküle

Unser kompaktes ICAD-NO<sub>x</sub>-Messgerät bestimmt die Konzentration von Stickoxid, indem es Umgebungsluft ansaugt und durch eine Messzelle von rund einem halben Meter Länge leitet. Die Messzelle wird dabei zunächst mit blauem Licht einer LED durchleuchtet. NO<sub>2</sub> absorbiert einen Teil dieser Strahlung, wobei die Absorption des NO<sub>2</sub>-Moleküls in charakteristischer Weise mit der Wellenlänge variiert. Diese Variation ist gleichsam der Fingerabdruck des Moleküls. Die Stärke der Absorption ist für ein gegebenes Molekül (hier NO<sub>2</sub>) charakteristisch: Sie ändert sich nie und wird ein für alle Mal im Labor bestimmt. Dieses Spektrum wird anschließend mit einem Kompaktspektrometer analysiert.

Die Bestimmung der Konzentration erfolgt mit der von uns bereits im Jahr 1979 entwickelten, inzwischen weltweit angewendeten „Differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie“ (DOAS). Sie liefert bei bekanntem Absorptionsweg absolut kalibrierte Ergebnisse. Die Absorption des NO<sub>2</sub>-Moleküls ist bei typischen Stadtluft-Konzentrationen von wenigen Dezimetern jedoch extrem schwach und damit für fast alle Anwendungen unzureichend. Aus diesem Grund statten wir die Messzelle mit zwei hochreflektiven Spiegeln aus, die zusammen einen optischen Resonator bilden. Das Licht läuft zwischen den beiden Spiegeln einige Tausend Male hin und her: Der effektive Lichtweg wird dadurch auf über einen Kilometer verlängert. Das Resultat sind sehr präzise Messungen, die selbst noch 0,05 µg/m<sup>3</sup> Stickstoffdioxid in der Umgebungsluft

erfassen können. In der wissenschaftlich gebräuchlichen Angabe entspricht dies circa 0,1 „parts per billion“ (ppb), das heißt „Teilen pro Milliarde“.

Zunächst misst das Gerät mittels DOAS die Konzentration von NO<sub>2</sub>. Die verschiedenen sonstigen Gase und Aerosole in der Messzelle können jedoch den Absorptionslichtweg verkürzen. Diesen Effekt zu bestimmen, war bisher technisch aufwendig, unter anderem aufgrund hoher Anforderungen an die optische und mechanische Stabilität des Aufbaus. Wir lösen dieses Problem mathematisch mit einem von uns entwickelten ICAD-Algorithmus (Iterative Cavity DOAS). Damit lässt sich der tatsächliche Lichtweg bei der Messung – und damit die wahre Konzentration – hinreichend genau rekonstruieren, ohne dass man hohe Anforderungen an die Apparatur stellen muss. Da Stickstoffdioxid direkt bestimmt wird – und nicht indirekt über eine Umwandlung von NO<sub>2</sub> in NO, wie es bei bislang etablierten Messverfahren der Fall ist – sind schnelle und präzise Messungen möglich. Dank unserer DOAS-Methode kann auch auf die aufwendige Kalibration mit Prüfgasen verzichtet werden. Unser Messgerät ist zudem deutlich einfacher aufgebaut, es ist leicht, vibrationsunempfindlich, mobil einsetzbar, und es erlaubt eine sehr hohe Zeitauflösung mit einer hohen Messgenauigkeit.

#### Von der Immissions- zur Emissionsmessung

Das innovative Instrument unserer Arbeitsgruppe wird inzwischen nicht nur eingesetzt, um die Luftqualität zu analysieren und zu überwachen (Immissionsmessung). Es wird auch im Bereich der Abgasmessung angewendet, als Teil der Emissionsmessung. Bis heute weiß man relativ wenig über den wahren Stickoxid-Ausstoß unter realen Betriebsbedingungen beziehungsweise im Laufe des Lebenszyklus eines Fahrzeuges. Derartige Emissionsbestimmungen sind aufgrund des hohen Aufwandes weder Teil der Abgasuntersuchung noch der Neuwagenprüfung. Sie werden nur bei der Typenzulassung im Labor untersucht.

**„Wenige Fahrzeuge verursachen einen Großteil der Stickoxid-Emissionen.“**

Zwar ermöglichen es genaue, aber sehr aufwendige mobile Messgeräte (sogenannte PEMS = Portable Emission Measurement Systems), die Emission auch im realen Betrieb zu bestimmen. Diese Messgeräte gelten europaweit jedoch bislang nur für neue LKW-Typen. Ab September 2017 sollen sie schrittweise auch für neue PKW-Typen und leichte Nutzfahrzeuge eingeführt werden – als neue Testprozedur unter dem Schlagwort „Real Drive Emission“ (RDE). Demnach sollen Abgase also nicht mehr allein auf dem Prüfstand – das heißt unter idealisierten Laborbedingungen –, sondern im realen Straßenverkehr bestimmt werden. Problematisch aus unserer Sicht ist jedoch, dass lediglich bei der Typzulassung – und somit nur für ein (und zudem fabrikneues) Fahrzeug einer Modellkonfiguration – gemessen wird und dann auch nur direkt am Fahrzeug. Damit können Variationen zwischen verschiedenen Exemplaren des gleichen Modells oder durch Alterung und Defekte verursachte Veränderungen nicht erfasst werden. Unsere Arbeitsgruppe geht daher einen anderen, unabhängigen Weg.

#### Ein neuer Ansatz

Wir bestimmen die Emissionen von Stickoxid, indem wir die Luft aus der Abgasfahne eines vorausfahrenden Fahrzeuges durch eine Sonde oder einen Trichter ansaugen und sie sodann durch das ICAD-NO<sub>x</sub>-Messgerät leiten. Für die Anwendung im Abgasbereich konnten wir unser Messsystem mittlerweile so erweitern, dass zusätzlich Stickstoffmonoxid in Stickstoffdioxid umgewandelt wird. Auf diese Weise können wir die relevanten gesamten Stickoxid(NO<sub>x</sub>)-Emissionen bestimmen.

Es gilt zudem zu berücksichtigen, dass sich die Emissionen von der Quelle – dem Auspuff – bis hin zum Messgerät verdünnen. Wird gleichzeitig die Konzentration eines Markierungsstoffes bestimmt, dessen Emission gut bekannt ist, kann die Verdünnung genau ermittelt werden. Wir verwenden hierzu CO<sub>2</sub>, das in circa tausendfach höherer Konzentration als NO<sub>x</sub> ausgestoßen wird und daher – gleichfalls durch Absorptionsspektroskopie – sehr leicht messbar ist. Somit lässt sich mit einer einfachen Erfassung von NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> in der Abgasfahne die Emission von Stickoxid mit einer Genauigkeit von zehn bis zwanzig Prozent bestimmen. Damit erreicht unsere Methode zwar nicht ganz die Genauigkeit von Messsystemen direkt am Fahrzeug (PEMS) – dafür aber können wir ein aussagekräftiges Ergebnis statt in vielen Stunden innerhalb weniger Minuten erzielen. Das macht es möglich, in kurzer Zeit nicht nur Neuwagen, sondern auch viele Fahrzeugtypen wie PKWs, Motorräder, Busse und LKWs zu untersuchen.

#### Im Praxistest überzeugend

Mehr als 1.000 Fahrzeuge haben wir bereits mit unserem Mess-PKW untersucht. Es erwies sich, dass unser neues Gerät den Stickstoffdioxid- beziehungsweise Stickoxid-

**„Die Einführung der Umweltzonen mit Feinstaubplaketten vor einigen Jahren konnte kaum etwas dazu beitragen, das wahre Problem der hohen Luftverschmutzung anzugehen.“**

Anteil in den Abgasfahnen der Fahrzeuge unter realen Bedingungen erfolgreich bestimmen kann. Wichtig dabei ist, die Messpunkte innerhalb der Emissionsfahne eines einzelnen Fahrzeugs zu legen, um weitgehend zu vermeiden, dass sich die Abgase anderer Fahrzeuge miteinander vermischen – bei sehr starkem Verkehrsaufkommen ist das regelmäßig eine Herausforderung.

Im Praxistest wurde das ICAD-NO<sub>x</sub>-Instrument erstmals im Jahr 2014 bei Messungen im Auftrag der Stadt Mainz eingesetzt. Mehr als 730 Fahrzeuge wurden dabei im realen Stadtverkehr erfasst. Aufgrund der Schadstoffkonzentrationen in den Abgasfahnen konnten wir auf die Emissionen der einzelnen Fahrzeuge rückschließen. Dabei zeigte sich: Es bestehen nicht nur (wie erwartet) große Unterschiede der Emissionen zwischen verschiedenen Kategorien von Fahrzeugen (PKWs, Busse etc.), sondern auch innerhalb einer Kategorie selbst. Die Stickoxid-Emissionen variieren sehr stark von Fahrzeug zu Fahrzeug und hängen von zahlreichen Parametern ab, seien es Motortyp, Abgasbehandlung, Alter, Zustand oder Fahreigenschaften. Die Rolle dieser unterschiedlichen Parameter ist bislang nicht genau bekannt.

Ein weiteres Problem ist es, Daten zu erheben, die Behörden und Wissenschaft befähigen, die Stickoxid-Emissionen verschiedener Fahrzeuge präzise abzuschätzen und deren Beitrag zur Luftverschmutzung zu bestimmen. Diese Informationen sind erforderlich, um Maßnahmen zu treffen, die die Luftqualität wirkungsvoll verbessern können. Hierzu fehlen aber nicht nur weitere verlässliche Fahrzeugemissionsdaten unter realen Fahrbedingungen, sondern auch Untersuchungen zu den tatsächlich gefahrenen Kilometern verschiedener Fahrzeugtypen. Hier ist noch viel Forschungsarbeit nötig, um genaue Aussagen treffen zu können. Nur mithilfe zusätzlicher umfassender Analysen werden wirkungsvolle Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität möglich werden.

#### Ergebnisse der Mainzer Studie

Unsere Mainzer Studie vermittelt ein interessantes Bild der wahren Emissionen; die Ergebnisse sind sicher auch für andere Städte aufschlussreich. Danach fallen nur 7,6 Prozent aller Fahrzeuge in die Kategorie „sehr hohe Emissionen“ an Stickstoffdioxid mit Konzentrationen von über 1.000 Mikrogramm pro Kubikmeter in der Abgasfahne. Vor allem Busse älterer Bauart (oft mit nachgerüsteten Feinstaubfiltern), aber auch einzelne PKWs und Motorräder finden sich in dieser Kategorie – sie sind unseren Daten nach für 45 Prozent der gesamten direkten Stickstoffdioxid-Emissionen verantwortlich. Mit anderen Worten: Die Umweltbelastung könnte durch technische Nachbesserungen oder durch den Ausschluss von nur wenigen Fahrzeugen nahezu halbiert werden. Um die Hauptverursacher hoher Schadstoffbelastung zu





DR. DENIS PÖHLER studierte Physik an den Universitäten Würzburg und Edinburgh, Schottland. Im Jahr 2010 wurde er von der Universität Heidelberg in der Umweltphysik zur Bestimmung von zweidimensionalen Spurengasverteilungen mittels tomographischen LP-DOAS-Messungen in der Stadt Heidelberg promoviert. Seitdem arbeitet er als Postdoktorand weiterhin am Institut für Umweltphysik und leitet hier zahlreiche Projekte am Lehrstuhl von Prof. Dr. Ulrich Platt, unter anderem zur Erforschung von Halogenen in polaren und maritimen Umgebungen sowie zur Entwicklung von Langpfad(LP)- und Cavity-Enhanced (CE)-DOAS-Messinstrumenten für die Atmosphärenforschung sowie zum Monitoring urbaner Luftverschmutzung. Von April 2016 bis September 2017 ist er Projektleiter der renommierten Gründungsförderung „EXIST-Forschungstransfer“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und der EU.

Kontakt: denis.poehler@iup.uni-heidelberg.de

**„Die Emissionen spielen nicht allein eine Rolle für Anwohner und Passanten – auch die Autofahrer selbst sind betroffen.“**



PROF. DR. ULRICH PLATT wurde im Jahr 1989 als Professor für Experimentalphysik an die Universität Heidelberg berufen. Zuvor forschte er mehrere Jahre am Institut für Atmosphärische Chemie der Kernforschungsanlage Jülich (heute: Forschungszentrum Jülich) sowie am Statewide Air Pollution Research Center der University of Riverside in Kalifornien, USA. 1984 folgte die Habilitation im Bereich Geophysik an der Universität Köln. Von 1990 bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2015 war Ulrich Platt Direktor am Heidelberger Institut für Umweltphysik. In dieser Funktion (und auch als pensionierter Hochschullehrer) leitete und leitet er zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit dem physikalischen Verständnis unserer Umwelt befassen. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die Troposphärenchemie. Er entwickelte maßgeblich die Methode der Differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie (DOAS) zur Messung von Schadstoffen und Spurengasen – ein Verfahren, das die Entwicklung von Atmosphärenmodellen revolutioniert hat – und wendet diese zur Untersuchung der Atmosphäre an.

Kontakt: ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de

# „Die zu hohen Stickstoffdioxid-Werte sind ein weit größeres Problem, als es die Feinstaubwerte jemals waren.“

ermitteln, lassen sich die Daten heranziehen, die wir bei unseren mobilen Messungen erfasst haben. Für die Stadt Mainz konnten gravierende Schwachstellen der bisherigen Modellrechnungen aufgezeigt werden, vor allem durch Ungenauigkeiten der Parameter wie Fahrzeugverteilung, Fahrzeugflotte oder Emissionswerte.

Noch sind weitere Analysen nötig, um die Frage zu beantworten, zu welchen Anteilen einzelne Fahrzeuge beziehungsweise Fahrzeuggruppen – abhängig von Alter, Zustand oder Motor – zur Luftverschmutzung im Stadtverkehr beitragen. In diesem Jahr finden daher zusätzliche Kampagnen für Abgasmessungen an PKWs, Bussen und zahlreichen LKWs statt. Zudem sind weitere Anwendungen im Emissionsbereich geplant.

Die Emissionen der Fahrzeuge spielen aber nicht nur eine Rolle für Anwohner und Passanten. Auch die Autofahrer selbst sind von den Abgasen betroffen. Entgegen der allgemeinen Annahme, dass die Insassen eines Fahrzeugs hiervon geschützt seien, konnten wir Folgendes zeigen: Die von den vorausfahrenden Fahrzeugen emittierten Stickoxide gelangen fast ungehindert durch die Lüftung ins Fahrzeuginnere (bei typischen Standardfiltern für die Fahrzeuglüftung). Mehrtägige PKW-Innenraummessungen zeigten, dass die Belastung von Autofahrern und Insassen dauerhaft sehr hohe Werte erreicht. In Tunneln lag diese bei fast  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – und damit deutlich über dem Grenzwert –, auf der Autobahn bei über  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und in der Stadt bei über  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Somit ist von einer akuten Gesundheits-

gefährdung auch der Autofahrer selbst auszugehen. Die Werte liegen zudem deutlich höher als die zeitgleich an Umweltmessstationen bestimmten Konzentrationen. Das zeigt, dass Fahrzeuginsassen noch einmal deutlich höheren Belastungen ausgesetzt sein können als etwa Passanten.

## Mehr Stickstoffdioxid, weniger Feinstaub

Über unseren Forschungsauftrag hinaus sehen wir es als unsere Aufgabe an, die Bevölkerung aufzuklären. Dazu gehört es, die in Gesellschaft, Politik und Medien weitverbreitete Verwechslung der Begriffe „Feinstaub“ und „Stickstoffdioxide“ klarzustellen. Beide Luftschadstoffe haben gesundheitliche Auswirkungen, die jedoch sehr unterschiedlich sein können. Auch die Verursacher dieser Luftschadstoffe und die Möglichkeiten, sie zu reduzieren, sind sehr unterschiedlich.

Laut Umweltbundesamt wurde der seit 2010 in Deutschland gültige Jahresgrenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für Stickstoff-

## EXIST – Aus Wissenschaft wird Business

Mit seinem Programm „EXIST-Forschungstransfer“ fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) herausragende forschungsbasierte Gründungsvorhaben mit hohem und risikoreichem Entwicklungsaufwand. Acht Gründungsteams aus Heidelberg, darunter auch die Entwickler des innovativen ICAD-NO<sub>x</sub>-Messgeräts, haben in den letzten Jahren das anspruchsvolle Bewerbungsverfahren erfolgreich durchlaufen und konnten in Berlin die Jury von den Erfolgsaussichten ihrer Projekte überzeugen. Für die Universität Heidelberg bedeutet das ein Fördervolumen von etwa 6,5 Millionen Euro.

Das Programm besteht aus zwei Förderphasen. In einem ersten Schritt sollen Forschungsergebnisse, die über das Potenzial für eine Unternehmensgründung verfügen, weiterentwickelt werden. Ziel ist es, wissenschaftliche Ergebnisse in technische Produkte und Verfahren zu überführen, die darauf basierende Geschäftsidee zu einem Businessplan ausarbeiten und die geplante Unternehmensgründung vorzubereiten. Hierbei werden pro Projekt bis zu vier Arbeitsplätze – davon einer mit wirtschaftlichem Hintergrund – sowie Materialkosten zum Beispiel zur Herstellung von Prototypen finanziert. Im Anschluss kann eine zweite Förderphase beantragt werden, in der weitere Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden. Im Fokus stehen dabei konkrete Maßnahmen zur Aufnahme der Geschäftstätigkeit. Zudem sollen die Voraussetzungen für eine externe Unternehmensfinanzierung geschaffen werden. Der EXIST-Forschungstransfer wird vom Europäischen Sozialfonds kofinanziert.

TOXIC

# AIR POLLUTION IN THE CITY

ULRICH PLATT &amp; DENIS PÖHLER

Ever since VW diesel gate, nitrogen oxide emissions have become the focus of public debate. What researchers, environmental organisations, and stakeholders in politics and industry have been analysing for years has now become a much-discussed issue in mainstream society: Nitrogen oxides are highly toxic, and their concentration in cities is reaching harmful levels – however, they are difficult to measure under real conditions. The validity of results obtained with conventional measuring methods is also regularly criticised. Researchers at the Institute of Environmental Physics have now developed a new mobile measurement method that overcomes nearly all significant disadvantages of established instruments.

The innovative measurement method combines the technique of differential optical absorption spectroscopy (DOAS) developed by Heidelberg environmental physicists with optical resonators and a new retrieval algorithm. In this method, blue light is transmitted through a measurement cell. Using special, highly reflective mirrors, the light path of forty centimetres is extended to over one kilometre in order to achieve the necessary measurement accuracy. The concentration of nitrogen dioxide in the air is determined by its attenuation, specifically the absorption of light over a spectral range of around 30 nanometres. We make use of the fact that each molecule has its own characteristic absorption fingerprint and can therefore be uniquely identified. With an additional converter for nitrogen monoxide and a CO<sub>2</sub> module, scientists of Heidelberg University have succeeded in developing a compact, robust and easy-to-handle pollutant measurement device that can also be used to determine the emissions of vehicles. The new method has already been successfully applied in various studies. ●

**“Nitrogen oxides are highly toxic, and their concentration in cities is reaching harmful levels – however, they are difficult to measure under real conditions. Heidelberg environmental physicists have now developed an innovative solution to this problem.”**

PROF. DR ULRICH PLATT accepted the Chair of Experimental Physics at Heidelberg University in 1989. The physicist previously worked several years at the Institute for Atmospheric Chemistry of the Nuclear Research Centre Jülich (today 'Forschungszentrum Jülich') as well as at the Statewide Air Pollution Research Center of the University of Riverside in California, USA. In 1985 he completed his habilitation in geophysics at the University of Cologne. From 1990 until his retirement in 2015 he headed the Institute of Environmental Physics at Heidelberg University. In this function he conducted – and still conducts – numerous research projects concentrating on the physical understanding of our environment. His research focus is tropospheric chemistry. He was one of the principal researchers involved in the development and continuous application of differential optical absorption spectroscopy (DOAS), a technique for the measurement of pollutants and trace gases that has revolutionised the development of atmospheric models.

Contact: [ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de](mailto:ulrich.platt@iup.uni-heidelberg.de)

DR DENIS PÖHLER studied physics at the universities of Würzburg in Germany and Edinburgh in Scotland. In 2010 he obtained his PhD in environmental physics from Heidelberg University with a thesis on the determination of two-dimensional trace gas distributions using tomographic LP-DOAS measurements in the city of Heidelberg. As a post-doctoral fellow at the Institute of Environmental Physics, he manages several projects at the chair of Prof. Dr Ulrich Platt that concern such research fields as halogens in polar and maritime environments and the development of longpath (LP) and cavity enhanced (CE) DOAS measuring instruments for atmospheric research as well as for monitoring urban pollution. From April 2016 to September 2017 he will head a project under the renowned German start-up promotion programme 'EXIST-Transfer of Research' that is funded by the EU and the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

Contact: [denis.poehler@iup.uni-heidelberg.de](mailto:denis.poehler@iup.uni-heidelberg.de)

dioxid in den letzten Jahren an etwa sechzig Prozent der verkehrsnahen deutschen Messstationen überschritten – lediglich zwei deutsche Messstationen hingegen liegen noch über dem gesetzlichen Grenzwert für Feinstaub. Die öffentliche Wahrnehmung hinsichtlich der Luftqualität aber wurde und wird dominiert von Berichten über erhöhte Feinstaubwerte. Tatsächlich lagen die Feinstaubmesswerte in den meisten deutschen Städten zum letzten Mal Ende der 1990er-Jahre über dem geltenden Grenzwert. Es zeigt sich: Die zu hohen Stickstoffdioxid-Werte sind ein weit größeres Problem, als es die Feinstaubwerte jemals waren.

Die Einführung der Umweltzonen mit Feinstaubplakette vor einigen Jahren konnte nichts oder nur wenig dazu beitragen, das wahre Problem der hohen Stickoxid-Werte anzugehen. Im Gegenteil: Die dadurch veranlasste Nachrüstung mit Partikelfiltern (Rußfiltern) in älteren Dieselfahrzeugen hat die direkte Emission von Stickstoffdioxid dieser Fahrzeuge noch erhöht. Ursache ist die Funktionsweise der meisten Partikelfilter, die eine weitere Oxidation von Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid bewirkt und damit zu einer erhöhten Emission von  $\text{NO}_2$  führt. Während unserer städtischen Messungen konnten wir vielfach nachweisen, dass gerade ältere Busse unabhängig vom Fahrzeugtyp – erst recht, wenn die nachgerüstete Technik Feinstaub reduziert – einen hohen Stickstoffdioxid-Ausstoß aufweisen.

Die Städte werden also mehr als bisher gegen die zu hohen, gesundheitsgefährdenden  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen vorgehen müssen – und das nicht erst seit dem 2015 drohenden EU-Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland. In diesem Zusammenhang wird derzeit auch diskutiert, eine blaue Umweltzone einzuführen. Wichtig dabei ist, dass die zahlreichen Maßnahmen der Luftreinhaltepläne auch real messbar sind. Auch hierfür wollen wir mit unserem mobilen Messgerät Lösungsansätze bieten.

#### Die Zukunft unseres Messverfahrens

Das entwickelte ICAD-Messverfahren ist nicht alleine auf die Untersuchung von Stickoxiden begrenzt. Das DOAS-Verfahren ist flexibel, und durch die Wahl verschiedener Spektralbereiche können grundsätzlich auch andere Gase gemessen werden. Es konnten bereits Testsysteme untersucht werden, die neben dem bisherigen blauen Spektralbereich auch im UV-Bereich ab 340 Nanometern bis in den roten Spektralbereich arbeiten. Damit wird es bereits in absehbarer Zukunft möglich, weitere Schadstoffe und Spurengase wie Formaldehyd, salpetrige Säure und zahlreiche Halogenverbindungen zu bestimmen. Eine weitere Ausweitung der Messungen in den UV-Spektralbereich ist wünschenswert, denn damit können auch Luftschadstoffe analysiert werden, die zwar eine große Bedeutung für die Gesundheitsvorsorge haben, bislang aber nur sehr schwer untersucht werden können, beispielsweise Aromate, Ammoniak und Schwefeldioxid.

**„Die Städte werden mehr als bisher gegen die gesundheitsgefährdenden Schadstoffkonzentrationen vorgehen müssen.“**

Seit April 2016 wird unsere Forschungsgruppe als „EXIST-Forschungstransfer-Projekt“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie finanziell getragen. Das Hauptziel des Projektes ist es, die Messsysteme bis hin zur Kommerzialisierung weiterzuentwickeln. In einem künftigen Start-up-Unternehmen soll das Messsystem dann soweit zur Marktreife gebracht werden, dass es auch für andere Nutzer verfügbar wird. Nicht nur für den wissenschaftlichen Einsatz zur Umweltanalyse, sondern auch bei der Luftqualitäts- sowie der Emissionsüberwachung böte es viele Vorteile im Vergleich zu bestehenden Messverfahren. Auch Überwachungsanwendungen in Medizin und Industrie – zum Beispiel bei der Atemanalyse und in der Prozessindustrie – sind damit möglich. Eine universitäre Ausgründung ist für die nächsten Monate vorgesehen. ●

**VORHANG**

**AUF**

**VORHANG**

**ZU**

VORHANG AUF – VORHANG ZU

# DAS SCHAUSPIEL DER MOLEKÜLE

MARCUS MOTZKUS

**Wie schwingt ein Molekül? Was sind die ersten molekularen Schritte während des Sehens? Wie wird Energie bei der Photosynthese übertragen? All diese Prozesse lassen sich nicht unmittelbar beobachten, weil sie in unvorstellbar kurzen Zeiträumen erfolgen. Kombiniert man ultrakurze Laserimpulse mit der sogenannten Pump-Probe-Spektroskopie, lassen sich auch solche ultraschnellen Geschehnisse in Echtzeit beobachten. Das Verfahren macht es auch möglich, die molekulare Dynamik mit maßgeschneiderten Lichtimpulsen gezielt zu manipulieren, also beispielsweise zu stoppen – und in anderer Richtung fortzusetzen.**

# W

Warum bekommen die Blätter eines Baumes keinen Sonnenbrand? Wie wandelt die Photosynthese das Sonnenlicht in Energie um? Was macht das Licht während des Sehens? Den Antworten auf diese Fragen steht immer ein und dasselbe Problem im Wege: Die ersten Schritte dieser Prozesse laufen in einer für uns unvorstellbar kurzen Zeitspanne von Piko- bis wenigen Femtosekunden ab. Eine Femtosekunde entspricht dem millionsten Teil einer milliardstel Sekunde oder  $10^{-15}$  Sekunden. Das sind fast so viele Größenordnungen, wie zwischen einer Sekunde und der Entstehung des Universums liegen. Die Zeiten sind derart kurz, dass sie mit elektronischen Geräten nicht mehr gesteuert werden können – selbst die für die Schaltung notwendigen Elektronen sind dafür zu langsam.

Bis vor nicht allzu langer Zeit waren ultraschnelle Prozesse dem direkten Blick des Forschers verschlossen. Den Wissenschaftlern blieb nur, indirekt – aus den Messungen vor und unmittelbar nach der Reaktion – auf das eigentliche Geschehen zu schließen. Das Problem, Ausgangsstoffe und fertige chemische Produkte zu bestimmen und daraus auf die Dynamik der dazwischenliegenden chemischen Reaktion zu schließen, lässt sich nach einem der Pioniere auf diesem Feld, dem ägyptischen Chemiker und Nobelpreisträger Ahmed Zewail, am Beispiel eines klassischen Theaterstücks von Shakespeare veranschaulichen: Im ersten Akt stellen sich die zahlreichen Protagonisten vor (= die einzelnen Ausgangsstoffe beziehungsweise Moleküle), und der große Rahmen des Stücks wird abgesteckt. Nach dem ersten Akt wird der Vorhang geschlossen – und dabei bleibt es, auch während der nachfolgenden drei Akte, in denen die eigentliche Handlung abläuft. Der Vorhang öffnet sich erst wieder zum finalen fünften Akt. Der Zuschauer erkennt, dass einige der Protagonisten tot und erschlagen auf dem Boden liegen, andere haben die Bühne verlassen. Die Aufgabe der Wissenschaftler ist es nun, aus den Positionen der Schauspieler und weiterer Indizien auf die Handlung des Stücks zu schließen – was zu durchaus aufregenden, zumeist aber vollkommen unterschiedlichen Geschichten führen wird.

# „Bis vor nicht allzu langer Zeit waren ultraschnelle Prozesse dem direkten Blick des Forschers verschlossen.“

Eine Methode, doch ein wenig vom „Schauspiel der Moleküle“ selbst zu sehen, ist, den Vorhang auch während der mittleren Akte zu verschiedenen Zeiten zu öffnen. Genau das ermöglicht die „Pump-Probe-Technik“. Deren Prinzip ähnelt der Aufnahme von Filmen: Möchte man ein schnelles Objekt scharf abbilden, muss man eine kurze Belichtungszeit wählen. Für die scharfe Aufnahme eines Formel-1-Rennwagens reicht die Belichtung von einer tausendstel Sekunde aus, um die Bewegung der Atome eines Moleküls aber festzuhalten, sind Belichtungszeiten unterhalb des Pikosekundenbereichs ( $10^{-12}$  Sekunden) erforderlich. Die Belichtung wird ähnlich eines Stroboskops durch Lichtblitze erreicht, und die ultrakurzen Impulse werden mittels aufwendiger Lasersysteme erzeugt.

## Aufschlussreiche Momentaufnahmen

Im Gegensatz zu einem Film, bei dem Szenen hintereinander aufgenommen werden und die Bewegung durch einzelne Momentaufnahmen abgerastert wird, muss die Bewegung auf den ultrakurzen Zeitskalen in anderer Weise erfasst werden, denn nach jedem Laserimpuls folgt zunächst eine längere „Totzeit“. Bei der Pump-Probe-Technik wird durch einen ersten Laserimpuls zunächst die jeweilige Reaktion initiiert. Anschließend werden die Reaktionen mit einem zweiten Laserimpuls abgefragt, der vom ersten Impuls abgezweigt wurde und zeitlich verzögert ankommt. Dieser Vorgang wird wiederholt, und zwar so, dass der zweite Impuls zeitlich jedes Mal ein wenig weiter nach hinten geschoben erfolgt. Die Voraussetzung für ein solches Vorgehen ist, dass man immer mit einer gleichartigen Startsituation beginnt. Folglich lassen sich hiermit nur jene Prozesse untersuchen, die sich sehr gut reproduzieren lassen – eine Bedingung, die bei den eingangs genannten Phänomenen erfüllt ist.

Aus den auf diese Weise sukzessive erstellten Momentaufnahmen lässt sich schließlich ein Film zusammensetzen, der die Bewegung zeigt. Hier endet die Analogie zu den Filmaufnahmen, denn während bei einem Film das Objekt als Ganzes abgebildet wird, liefert die Wechselwirkung mit dem Laserimpuls einen sehr indirekten Kontrast. Wollen wir zum Beispiel den Transfer der Energie nach der Anregung durch Licht bei einem Molekül der Photosynthese untersuchen, lässt sich die Dynamik dieses Prozesses über die Besetzung verschiedener angeregter elektronischer Zustände verfolgen. Die Besetzung eines Zustands kann durch die Wahl der geeigneten Lichtfrequenz in einen höheren Zustand gehoben werden. Die Absorption des Photons bei diesem Prozess verursacht dann das eigentliche Messsignal. Wird nun diese Absorption zeitaufgelöst durch das schrittweise Verschieben des zeitlichen Abstands zwischen dem anregenden Impuls (Pumpimpuls) und dem abfragenden Impuls (Probeimpuls) vermessen, lässt sich die Rate bestimmen, mit der der Zustand bevölkert wird.



### Interpretation komplexer Molekülschauspiele

Die Aufgabe von Lichtsammelkomplexen in der Photosynthese ist es, das in der Umgebung vorhandene Licht aufzunehmen und die absorbierte Energie über eine Reihe von Energie- und Ladungstransferprozessen dem Reaktionszentrum für die eigentliche Photosynthese verfügbar zu machen. Für die Absorption des Sonnenlichts sind Pigmente, unter anderem Carotinoide, zuständig. Die Molekülklasse der Carotinoide zeichnet sich durch ein komplexes, auf äußere Einflüsse ausgesprochen flexibel reagierendes Netzwerk von elektronisch angeregten Zuständen aus. Nach der Anregung durch Licht laufen in den Molekülen mehrere Zustände nacheinander ab, wobei Zeitkonstanten von weniger als hundert Femtosekunden auftreten. Leider ist die Absorption bei bestimmten Wellenlängen nicht immer spezifisch für nur einen Zustand, sondern kann auch bei einem anderen Übergang zur Absorption führen. Dann ist es nicht eindeutig klar, welcher Zustand besetzt worden ist. Diese Zweideutigkeit kann die Interpretation von komplexen Molekülsystemen extrem erschweren.

Das Ziel zahlreicher Forschungsgruppen weltweit ist es deshalb, die optischen Methoden so weiterzuentwickeln, dass neben der einfachen Absorption eines elektronischen Übergangs auch andere zeitabhängige Wechselwirkungen zur Signalentstehung genutzt werden können. Ähnlich der magnetischen Kernspinspektroskopie, in der komplexe Impulssequenzen eingesetzt werden, um Informationen über die Struktur von Molekülen oder biologischen Geweben zu erhalten, wurde das Konzept der „multidimensionalen Spektroskopie“ in den letzten Jahren von der Untersuchung niederenergetischer Kernspinzustände in den optischen Wellenlängenbereich überführt. Das macht es möglich, die Wechselwirkungen und Kopplungen von höherenergetischen molekularen Zuständen – etwa die Schwingungen oder elektronischen Zustände eines Quantensystems – direkt zu bestimmen. Für die Relaxationsprozesse innerhalb eines molekularen Systems ist es insbesondere wichtig, wie die elektronischen Zustände und die Schwingungszustände miteinander wechselwirken. Die Dynamik dieser Wechselwirkung wird in den ersten hundert Femtosekunden nach der Absorption eines Photons bestimmt. Wird der Probeimpuls (oder eine Sequenz von Probeimpulsen) im Experiment auf die Schwingungsresonanz einer chemischen Bindung eingestellt, die während einer chemischen Reaktion gebildet wird, lässt sich in Echtzeit verfolgen, wie sich diese Bindung ausbildet.

In Heidelberg nutzen wir die Probe-Pump-Technik, um die Dynamik unterschiedlicher „Chromophore“ zu untersuchen. Chromophore sind diejenigen Anteile eines Pigments oder Farbstoffs, die deren Farbigekeit erst möglich machen. Zu den in der Natur am häufigsten vorkommenden Pigmenten zählen die bereits erwähnten Carotinoide.

Sie sind in hohem Maße durch ihre Konjugationslänge gekennzeichnet, also der Anzahl der aufeinanderfolgenden einfach und zweifach gebundenen Kohlenstoffpaare. Das Carotinoid „Lycopen“ beispielsweise – es ist für das Rot der Tomate verantwortlich – besitzt eine Konjugationslänge von elf, wohingegen „Lutein“, das unter anderem im menschlichen Auge vorkommt und ins Orange gelbe geht, eine Länge von zehn hat. Durch die kürzere Länge werden die elektronisch angeregten Zustände zu höheren Energien hin verschoben. Das wiederum modifiziert das Netzwerk von Zuständen, das für den Energietransfer, etwa in Lichtsammelkomplexen, verantwortlich ist.

Mit der multidimensionalen Spektroskopie wird es möglich, nachzuverfolgen, wie die Energie nach der Lichtanregung eines Moleküls fließt. Insbesondere der Einfluss der Schwingungszustände – und damit die Dynamik der molekularen Struktur – lässt sich charakterisieren. Dabei zeigt sich, dass stärkere Kopplungsmechanismen wirken, wenn sich die Konjugationslänge verringert. Dann werden zusätzliche Zustände aktiv, die wiederum das weitere kinetische Netz beeinflussen. Das macht es möglich, besser zu verstehen, wie das kinetische Netzwerk arbeitet und welche Funktion die einzelnen Zustände beim Energie- und Ladungstransfer haben. Darüber hinaus eröffnet sich ein vielversprechender Weg, um die Dynamik in biologischen Proteinkomplexen oder komplexen Materialsystemen bestimmten strukturellen Parametern zuzuordnen.

### Neuartige Materialien

Gemeinsam mit Arbeitsgruppen der organischen und anorganischen Chemie der Universität Heidelberg wollen wir künftig prüfen, inwieweit sich das dynamische Verhalten von neuartigen organischen Molekülen durch ein gezieltes Verändern der Molekülstruktur so modifizieren lässt, dass sie als innovative Materialien für die organische Elektronik eingesetzt werden können. In einer ersten Studie konnten wir beispielsweise Folgendes zeigen: Das von dem Heidelberger Chemiker Uwe Bunz entwickelte neue Molekül „Tetraaza-TIPS-Pentacen“ zeigt nach Lichtanregung eine deutlich schnellere Dynamik als das Referenzmolekül „TIPS-Pentacen“. Bei dem neuen Molekül wurden vier Kohlenstoffatome durch Stickstoffatome ersetzt. Dadurch verändern sich die Energieniveaus, was zu einer beschleunigten photophysikalischen Dynamik führt und damit einen effizienteren Transfer der absorbierten Photoenergie ermöglicht.

Die mehrdimensionale Spektroskopie erlaubte es uns darüber hinaus, erstmals einen Zwischenzustand experimentell zu identifizieren, der bislang nur theoretisch postuliert worden war. Das Ziel künftiger Arbeiten wird es sein, mithilfe des systematischen Wechselspiels molekularer Modifikation und genauer Charakterisierung der



**PROF. DR. MARCUS MOTZKUS** folgte im Jahr 2009 einem Ruf der Universität Heidelberg an das Physikalisch-Chemische Institut, dessen Geschäftsführender Direktor er derzeit ist. Seine wissenschaftliche Laufbahn begann mit dem Studium der Fächer Geophysik, Geologie und Physik in Berlin und Aachen. Mitte der 1990er-Jahre wurde er in Physik von der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in München promoviert, anschließend arbeitete er im California Institute of Technology, USA. Für die Habilitation ging er zurück nach München an das Max-Planck-Institut für Quantenoptik. In der Folgezeit hatte er eine Gastprofessur an der Universität Besançon, Frankreich, eine Privatdozentur an der LMU München und eine Professur an der Philipps-Universität Marburg inne. Zu seinen Forschungsinteressen gehören die Dynamik von ultraschnellen Prozessen in komplexen Molekülen (Femtochemie) und deren Manipulation durch geformte Laserimpulse (kohärente Kontrolle), die Entwicklung und Anwendung von nichtlinearer zeitaufgelöster Spektroskopie sowie die nichtlineare optische Mikroskopie.

Kontakt: [marcus.motzkus@pci.uni-heidelberg.de](mailto:marcus.motzkus@pci.uni-heidelberg.de)

# „Das gezielte Anregen molekularer Prozesse mit maßgeschneiderten Lichtimpulsen eröffnet einen neuen Zugang zur Spektroskopie komplexer chemischer und biologischer Systeme.“

ultraschnellen Dynamik die Struktur-Funktion-Relation grundlegend zu verstehen. Dafür ist es wichtig, auch die Dynamik von Ladungsträgern an Grenzflächen zu untersuchen (Arbeitsgruppe von Petra Tegeder), was weitere Varianten der Pump-Probe-Technik erfordert.

Eine weitere sehr interessante Molekülklasse sind optische Schalter: Durch das Einstrahlen einer definierten optischen Frequenz lässt sich bei ihnen eine strukturelle molekulare Veränderung erzeugen, die sich durch das Einstrahlen einer weiteren Frequenz wieder umkehren lässt. Diese Klasse von Molekülen ist sehr wichtig, um biologische Mechanismen in den Lebenswissenschaften zu untersuchen. Die hier auftretenden molekularen Schaltprozesse laufen ebenfalls auf einer ultraschnellen Zeitskala im Bereich von Femtosekunden ab.

Für die meisten chemischen Fragestellungen reichen in der Regel Impulse im Bereich von wenigen Femtosekunden aus – das ist der Zeitbereich, in dem sich die Atomrümpfe innerhalb eines Moleküls bewegen. Die schnellste molekulare Schwingung ist durch das Wasserstoffmolekül gegeben: Es benötigt für eine vollständige Oszillation knapp acht Femtosekunden. Möchte man sich jedoch die Dynamik der sehr viel leichteren Elektronen anschauen, die sich um die Kerne bewegen, reicht diese Zeitskala nicht mehr aus. Dazu benötigt man Laserimpulse im Bereich von Attosekunden ( $10^{-18}$  Sekunden). Mit ihnen lässt sich untersuchen, wie sich die Elektronen um die Kerne bewegen. Dies wird von der Arbeitsgruppe um Thomas Pfeiffer im Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik experimentell und theoretisch von Lorenz Cederbaum im Physikalisch-Chemischen Institut der Universität Heidelberg erforscht.

Allen bisher beschriebenen Experimenten ist gemeinsam, dass ein erster Laserimpuls das Molekül anregt. Daraufhin schlägt das Molekül seinen von der Natur vorgezeigten Weg ein. Der Probeimpuls ist dabei so angelegt, dass er den natürlichen Lauf nicht beeinflusst. Erhöht man aber beispielsweise die Intensität des Probeimpuls, kann man den Impuls aktiv einsetzen, um den Ausgang einer Reaktion zu beeinflussen. Vergleichbar ist dies mit einer Murmelbahn, bei welcher der Anregungslaser die Murmel zunächst auf dem Startpunkt der Bahn positioniert. An einer bestimmten Position der Murmelbahn existiert eine Weiche, an der die Kugel in der Regel immer zu einer Seite rollt. Da die Zeitdauer bekannt ist, welche die Kugel vom Start bis zur Weiche benötigt, kann der Kugel zum richtigen Zeitpunkt ein kleiner Stoß gegeben werden: Jetzt folgt sie einer anderen Spur der Weiche und nimmt damit einen ganz anderen chemischen Reaktionspfad ein. Der „Stoß“ erfolgt im Experiment, indem ein maßgeschneiderter Laserimpuls eingestrahlt wird.

CURTAIN UP – CURTAIN DOWN

# THE DRAMA OF THE MOLECULES

MARCUS MOTZKUS

How does a molecule vibrate? What are the first molecular steps of visual perception? How is energy transmitted during photosynthesis? Until recently, all these processes were hidden from the researcher's eye because they take place over incredibly short periods of time. A combination of ultrashort femtosecond laser pulses and pump probe spectroscopy now allows us to observe such ultra-fast events in real time. The process also enables us to manipulate molecular dynamics by means of custom-made light pulses – or in other words, to stop and continue them in another direction.

In pump probe spectroscopy, a dynamic process is initiated by means of a laser pulse (the 'pump pulse') and then probed by another pulse (the 'probe pulse') after a certain delay. This creates a series of static snapshots which can then be combined to depict the entire process; in this way we can, for instance, observe the formation of a new chemical bond in real time. The trick is to gain as much information as possible from the individual snapshots. This is achieved with the help of modern multi-dimensional laser spectroscopy in the ultra-short femtosecond and attosecond range.

But custom-made optical pulses do not just allow us to observe molecular dynamics – we can also control them. This technique provides Heidelberg physical chemists with a completely new approach to the spectroscopy of complex chemical and biological systems. Among other things, the researchers hope to discover why and how complex molecular systems can be controlled through the interaction with light. ●

PROF. DR MARCUS MOTZKUS joined Heidelberg University's Institute for Physical Chemistry in 2009 and went on to become the institute's managing director. He began his academic career at TU Berlin and RWTH Aachen, where he studied geophysics, geology and physics. After completing his doctorate in physics at LMU Munich in the mid-1990s, he worked as a postdoc at the California Institute of Technology, USA. He returned to Munich to become a research project leader at the Max Planck Institute of Quantum Optics. In 2002 he completed his habilitation in physical chemistry at LMU and was a visiting professor at the University of Besançon in France. A year later he became Associate Professor of Physical Chemistry at the University of Marburg. Prof. Motzkus is particularly interested in the dynamics of ultra-fast processes in complex molecules (femtochemistry) and its coherent manipulation using shaped light (coherent control), the development and application of multidimensional time-resolved spectroscopy, and non-linear optical microscopy.

Contact: [marcus.motzkus@pci.uni-heidelberg.de](mailto:marcus.motzkus@pci.uni-heidelberg.de)

**“The targeted stimulation of molecular processes by means of custom-made light pulses opens up a new approach to the spectroscopy of complex chemical and biological systems.”**

### Die Dynamik großer biologischer Komplexe

Ein derartiges Beeinflussen chemischer Reaktionen und Quantensysteme durch Laserlicht wird als „kohärente Kontrolle“ bezeichnet. Neben der Intensität des Lichts werden hierzu noch weitere Eigenschaften des Lichts ausgenutzt, etwa die Phase, die Polarisation oder die Kohärenz. Es ist offensichtlich, dass sich die zeitliche Dynamik eines Moleküls – insbesondere die Dynamik großer biologischer Komplexe – nicht wie die einfache Bewegung der Murmel auf einer Bahn theoretisch vorhersagen lässt. Dafür müssen wir den experimentellen Ansatz erweitern. Im Experiment werden hierzu „Impulsformer“ verwendet: Sie können einen Laserimpuls definiert in eine beliebig komplexe Impulsform transformieren. Darüber hinaus werden evolutionäre Algorithmen eingesetzt: Mit ihrer Hilfe lässt sich der für das Kontrollproblem optimale Laserimpuls finden. Im Kontrollexperiment werden nun die unterschiedlichsten Impulsformen generiert, ihre Wirkung auf das molekulare System bestimmt und mit dem evolutionären Algorithmus in mehreren Durchläufen optimiert.

Mit diesem Ansatz ist es gelungen, biologische Funktionen zu kontrollieren, beispielsweise den Fluss der Energie innerhalb eines Lichtsammelkomplexes. Auch Mehrphotonenprozesse ließen sich gezielt anregen, was für die optische Mikroskopie wichtig ist. Neben der Frage, ob und zu welchem Grad sich Moleküle durch die Wechselwirkung mit Licht kontrollieren lassen, ist die eigentlich grundlegende Frage, warum und wie sich komplexe molekulare Systeme steuern lassen. Die Antwort auf diese Frage würde es ermöglichen, gezielt Strategien zu entwickeln, mit denen neue Zwischenzustände und Reaktionsprodukte geschaffen werden können. Beispiele sind das theoretisch vorhergesagte zyklische Ozon oder das Molekül „Vinyliden“, das in Verbrennungsprozessen als wichtiger Vorläufer der Rußbildung gilt.

Auch die Frage, ob die Eigenschaft der Kohärenz von Licht und Materie für biologische Prozesse bedeutsam ist, ließe sich dann beantworten. Da die Licht-Materie-Wechselwirkung direkt am eigentlichen Molekül optimiert wird, liefert ein optimaler Laserimpuls quasi einen Fingerabdruck der dynamischen Eigenschaften des Moleküls. Das gezielte Anregen oder Steuern eines molekularen Prozesses mit einem maßgeschneiderten Lichtimpuls eröffnet daher einen vollkommen neuen Zugang zur Spektroskopie komplexer chemischer und biologischer Systeme. Es wird künftig spannend sein zu erfahren, welche neue Formen der Spektroskopie sich hieraus entwickeln – und welche Informationen wir damit über bisher spektroskopisch unzugängliche molekulare Reaktionsprozesse erhalten werden. ●

„Ein optimaler  
Laserimpuls liefert  
quasi einen  
Fingerabdruck der  
dynamischen  
Eigenschaften des  
Moleküls.“

**FREIE**

**BAHN**

FREIE BAHN

# KOMPLEXITÄT BEHERRSCHEN

EKATERINA KOSTINA

**Allein in Deutschland ist die Anzahl der Flüge im letzten Jahrzehnt um fünfzig Prozent gestiegen. Das stellt an Fluglotsen und Flugplaner große Anforderungen. Damit sie den Flugverkehr optimal bewältigen können, sind dringend leistungsfähige Werkzeuge erforderlich, die ihnen helfen, Konflikte frühzeitig zu erkennen und zu lösen. Neue mathematische Entscheidungssysteme können dazu beitragen, Probleme derart großer Komplexität zu lösen und den Flugverkehr auch künftig im Fluss zu halten.**



**PROF. DR. EKATERINA KOSTINA** folgte im Jahr 2015 dem Ruf der Universität Heidelberg auf eine Professur für Numerische Mathematik. Nach dem Studium und der Promotion in Mathematik in Minsk wechselte sie im Jahr 1997 als Wissenschaftliche Assistentin an das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg. Zwischen 2006 und 2015 war sie Inhaberin des Lehrstuhls Numerische Optimierung der Universität Marburg. Sie ist Gründungsmitglied des nationalen Komitees für Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung (KoMSO). Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von numerischen Methoden der nichtlinearen Optimierung und optimalen Steuerung und deren Anwendung auf komplexe dynamische Prozesse in Wissenschaft und Technik. Zusammen mit Kollegen des IWR engagiert sie sich für das Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO).

Kontakt: [ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de](mailto:ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de)

# M

Mobilität gehört zu unserem täglichen Leben – und ein Leben ohne zu fliegen können wir uns in einer international vernetzten Gesellschaft kaum mehr vorstellen. Allein in Deutschland ist die Anzahl der Flüge in den letzten zehn Jahren um fünfzig Prozent gestiegen. Mittlerweile zählen wir hierzulande mehr als drei Millionen Flüge pro Jahr. Das bedeutet, dass jeden Tag mehr als 10.000 Flugzeuge starten, landen oder Deutschland überfliegen. Experten erwarten in den nächsten Jahren eine weitere jährliche Wachstumsrate von 2,5 Prozent. Trotz des immer stärker anwachsenden Luftverkehrs – das Fliegen ist immer noch die sicherste Reisemöglichkeit, nicht zuletzt dank der Fluglotsen. Sie überwachen jeden einzelnen Flug, identifizieren Konflikte, lösen sie frühzeitig und sorgen dafür, dass alle Flugzeuge zu jeder Zeit genügend Abstand voneinander halten.

Jederzeit die Sicherheit zu gewährleisten ist nicht die einzige Herausforderung, die sich im Flugverkehr stellt: Eine einzige Boeing 747 verbraucht pro Jahr rund fünfzig Millionen Liter Treibstoff. Das entspricht dem durchschnittlichen Verbrauch einer Flotte von 50.000 Mittelklasse-PKWs. Der hohe Treibstoffeinsatz ist nicht nur ein erheblicher Kostenfaktor – der Stickoxid- und Kohlendioxid-Ausstoß belastet auch die Umwelt. Viel Treibstoff wird vor allem in den Start- und Landephase gebraucht. Hier können Fluglotsen und Flugplaner entscheidend dazu beitragen, die Belastung zu reduzieren.

Eine weitere Herausforderung für die Flugsicherung und Flugplanung ist es, die Kapazität des Luftraums und der Flughäfen bei ständig steigender Flugdichte bestmöglich auszunutzen. So lassen sich Verspätungen am Boden und in der Luft verringern, die operative Effizienz verbessern und Kosten reduzieren. Dies stellt enorme Ansprüche an Lotsen und Planer. Damit sie den Verkehrsfluss optimal bewältigen können, brauchen sie dringend leistungsfähige Werkzeuge, die sie bei ihren Entscheidungen unterstützen.

Um den Flugverkehr der Zukunft zu meistern, bedarf es neuer Methoden der mathematischen Technologie der „Modellierung, Simulation und Optimierung“, kurz MSO. Die Flugsicherung und -planung zu optimieren ist ein höchst komplexes Unterfangen. Mit neu entwickelten

Verfahren der MSO haben wir uns in einem gemeinsamen Projekt mit der Deutschen Flugsicherung (DFS) zunächst einer Kernaufgabe angenommen, die sich in der Flugsicherung stellt: der Optimierung und optimalen Steuerung des sogenannten „Separation Managements“. Separation Management meint: Alle Flugzeuge in einem Sektor müssen so geleitet werden, dass definierte vertikale und horizontale Mindestabstände sicher eingehalten und Konfliktsituationen vermieden werden können. Es geht also darum, konfliktfreie Flugbahnen, sogenannte Trajektorien, zu berechnen.

## Modellierung, Simulation und Optimierung

Drei Grundbausteine bilden den Kern der mathematischen Technologie MSO – einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts:

„M“ wie **Modellierung**: Mathematische Modelle beschreiben in Form von Gleichungen, wie sich Prozesse räumlich und zeitlich entwickeln; hier: die Bewegungen aller Flugzeuge im gegebenen Luftraum. In unserer Anwendung sind dies die nichtlinearen Systeme von Differentialgleichungen der Flugdynamik.

„S“ wie **Simulation**: Komplexe Gleichungen dieser Art lassen sich in der Regel nur auf einem leistungsfähigen Computer mithilfe intelligenter, adaptiver numerischer Approximationsmethoden lösen.

„O“ wie **Optimierung**: Mit raffinierten mathematischen Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung werden diese Prozesse dann so gesteuert (das heißt die Entscheidungsvariablen und -optionen so gewählt), dass das Wunschkriterium (in unserem Fall eine möglichst geringe Abweichung von den ursprünglich geplanten Flugbahnen) bestmöglich realisiert wird. Dabei müssen zahlreiche Nebenbedingungen – vor allem die sicheren Mindestabstände – strikt eingehalten werden.

Wie lassen sich konfliktfreie Trajektorien berechnen? Dazu betrachtet man die simultane Optimierung sich überschneidender Flugbahnen aller Flugzeuge in einem überwachten Luftraumsektor. Das primäre Ziel dabei ist, konfliktfreie Flugbahnen zu berechnen. Diese Aufgabe lässt sich als „Optimalsteuerungsproblem“ formulieren. Das Optimierungsszenario umfasst dabei einen zwei- beziehungsweise dreidimensionalen Sektor, der von einer prinzipiell beliebigen Anzahl von Flugzeugen unterschiedlichen Typs zu beliebigen Zeitpunkten durchflogen wird.

Die Bewegung jedes Flugzeugs im Sektor führt mathematisch auf ein Differentialgleichungssystem. Das System beschreibt, wie sich die Flugrichtung und die räumliche Position zeitlich entwickeln. Das Flugzeug kann gesteuert werden, indem man seine Geschwindigkeit und seinen



Neigungswinkel ändert. Die Flugbahnen oder Trajektorien des Flugzeugs müssen dabei viele Nebenbedingungen erfüllen. Die wichtigste Nebenbedingung ist die „Bahnbeschränkung“: Zwischen zwei Flugzeugen muss jederzeit ein Mindestabstand von mindestens 300 Metern vertikal und zwischen drei und acht nautischen Meilen (5,6 und 14,8 Kilometer) horizontal bestehen. Weitere Nebenbedingungen sind die Anfangs- und Endzustände der Positionen und die Geschwindigkeiten der Flugzeuge.

### Dritte Säule der Wissenschaft: Das Wissenschaftliche Rechnen

Das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) wurde im Jahr 1987 als das bundesweit erste universitäre Forschungszentrum seiner Art gegründet. Die Forscher am IWR befassen sich mit Fragestellungen aus Natur-, Technik- und Geisteswissenschaften und bearbeiten sie mit dem Methodenrepertoire des Wissenschaftlichen Rechnens: der mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung, der Bild- und Datenverarbeitung sowie der Visualisierung. Als Querschnittsdisziplin trägt das Wissenschaftliche Rechnen entscheidend zur Lösung anspruchsvoller Probleme aus Wissenschaft und Technik bei und gilt damit als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Seine Methoden kommen bei so unterschiedlichen Fragen zum Einsatz wie dem Entwurf effizienter Brennstoffzellen, der Simulation der Vorgänge beim Hirninfarkt, der Prognose des Pestizidabbaus im Boden oder der Optimierung von Bewegungsabläufen.

Das IWR umfasst heute mehr als fünfzig Forscherteams aus unterschiedlichen Fakultäten sowie neun von jungen Wissenschaftlern geführte Nachwuchsgruppen. Rund 500 Forscherinnen und Forscher arbeiten im Rahmen des Zentrums in interdisziplinären Kooperationen zusammen. Neben Mathematik, Physik, Chemie und Informatik sowie den Lebenswissenschaften sind hier zunehmend auch die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die Psychologie, die Kognitionswissenschaften sowie die Geistes- und Kulturwissenschaften vertreten. Die Infrastruktur des IWR, auf welche die Forscher zurückgreifen können, umfasst unter anderem Hochleistungsrechner, dreidimensionale Graphiklabore sowie spezielle Laserscanner. Auf Initiative des IWR entstand 2007 die „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computergestützten Methoden in den Wissenschaften“ (HGS MathComp), die im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert wird. Hier forschen derzeit rund 150 Doktoranden aus allen am Zentrum vertretenen Fächern.

[www.iwr.uni-heidelberg.de](http://www.iwr.uni-heidelberg.de)

Sie werden durch ihre Eintrittspunkte in den Sektor, ihre Geschwindigkeiten und die gewünschten Ziele bestimmt.

Andere Nebenbedingungen hängen von den individuellen Fähigkeiten des Flugzeugs, also vom Flugzeugtyp, ab. Da jedes Flugzeug einer „nominellen“ Bahn und Geschwindigkeit folgt, die vorab individuell optimiert wurde, ist es aus Sicherheits- und Effizienzgründen wünschenswert, solche konfliktfreien Bahnen zu berechnen, die möglichst wenig von der ursprünglich optimierten Bahn abweichen. Die Optimierung berücksichtigt Änderungen des Geschwindigkeitsprofils, der Flugbahn, der Durchflugzeit in Sektoren oder den Neigungswinkel.

Da wir Trajektorien vieler Flugzeuge simultan optimieren müssen, ist das Optimalsteuerungsproblem von hoher Komplexität. Für seine effiziente Lösung brauchen wir spezielle strukturausnutzende Methoden, an deren Entwicklung wir derzeit in Heidelberg arbeiten.

### Von der Variationsrechnung zur optimalen Steuerung

Die modernen Methoden der optimalen Steuerung haben ihre Wurzeln in der Theorie der Variationsrechnung. Sie begann mit dem „Brachistochrone-Problem“, das im Jahr 1696 von dem Schweizer Mathematiker Johann Bernoulli formuliert wurde und die Frage stellt, wie eine Bahn in optimaler Weise geformt sein muss, damit ein Teilchen unter dem Einfluss der Schwerkraft in kürzester Zeit von einem Punkt A zu einem niedriger gelegenen Punkt B gelangt. Die Lösung des Brachistochrone-Problems durch Johann Bernoulli und seinen Bruder Jacob inspirierte herausragende Wissenschaftler wie Gottfried Wilhelm Leibniz und Isaac Newton. Die Mathematiker Leonhard Euler, Joseph-Louis Lagrange, Adrien-Marie Legendre und später Karl Theodor Weierstraß entwickelten im 18. und 19. Jahrhundert das grundlegende Variationskalkül, um optimale Trajektorien mithilfe notwendiger und hinreichender Bedingungen zu bestimmen. Dies führte schließlich zur modernen Optimierungstheorie.

In den frühen 1950er-Jahren wurde es notwendig, viele reale Anwendungsprobleme zu lösen, zum Beispiel in der Raumfahrt. So kam es zu einem weiteren Meilenstein, der Entwicklung des „Pontryaginschen Maximum-Prinzips“ der optimalen Steuerung. Auf diesem Prinzip basieren die sogenannten indirekten Lösungsverfahren. Bis in die 1980er-Jahre wurden diese Methoden mit teilweise spektakulären Ergebnissen eingesetzt, um nichtlineare Prozesse zu optimieren. Die optimale Steuerung muss dabei allerdings „indirekt“ aus einem nur sehr schwer aufzustellenden und zu lösenden Randwertproblem mit adjungierten Gleichungen bestimmt werden. Mit der wachsenden Komplexität praktischer Anwendungen erwies sich dieser Ansatz als nicht mehr problemgerecht. Er wurde deshalb von Verfahren abgelöst, bei denen die

„Mittlerweile zählen wir hierzulande mehr als drei Millionen Flüge pro Jahr: Das bedeutet, dass jeden Tag mehr als zehntausend Flugzeuge starten, landen oder Deutschland überfliegen.“

# „Mit Computerlösungen sind wesentlich bessere Ergebnisse zu erzielen als mit Konfliktbewältigungsstrategien von Experten.“

optimalen Steuerungen „direkt“ als Entscheidungsvariablen berechnet werden. Aktuell sind Verfahren, die auf der „direkten Mehrzielmethode“ beruhen, einer in den 1980er-Jahren von dem Heidelberger Mathematiker Hans Georg Bock eingeführten Methode. Am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg werden hocheffiziente Verfahren dieser Art von meiner und anderen Forschungsgruppen für zahlreiche verschiedene Problem- und Komplexitätsklassen erarbeitet und weiterentwickelt.

## Computer versus Experten

In unserem gemeinsam mit der Deutschen Flugsicherung durchgeführten Projekt haben wir verschiedene Szenarien komplizierter Konfliktsituationen untersucht. Das Ziel dabei war, Lösungen, die wir mit direkten Verfahren der optimalen Steuerung schnell und zuverlässig berechnet haben (Computerlösungen), mit den Konfliktbewältigungsstrategien von erfahrenen Fluglotsen (Expertenlösungen) zu vergleichen. Das Resultat der Studie ist aufschlussreich: Es zeigt sich eine deutliche Überlegenheit der Computerlösungen. Zum einen werden bei diesen alle Sicherheitsabstände strikt eingehalten – und gleichzeitig vollständig ausgenutzt, zum anderen ergeben sich wesentlich geringere Abweichungen von den ursprünglichen Flugbahnen. Dadurch verursachte Verspätungen sind deutlich seltener, der Luftverkehr wird flüssiger. Auch der Flugwegüberschuss –

die zusätzlich geflogenen Strecken aller Flugzeuge – lässt sich reduzieren. Der verfügbare Luftraum kann somit effizienter genutzt und die Systemkapazität erhöht werden. Dies demonstriert bereits eindrucksvoll das Potenzial der mathematischen MSO gegenüber heuristischen Lösungen.

## Ein Industry-on-Campus-Projekt: das HCO

Die Modellierung, Simulation und Optimierung (MSO) als mathematische Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts hat die Forschungs- und Entwicklungsarbeit in vielen Bereichen der Industrie und Wirtschaft nachhaltig verändert. Innovative Verfahren der MSO spielen heute eine entscheidende Rolle bei der Lösung komplexer wissenschaftlich-technischer Probleme. Dies gilt insbesondere für den Einsatz der modellgestützten numerischen Optimierung zur schnelleren, besseren und letztlich kostengünstigeren Entwicklung von industriellen Produkten und Prozessen unter Einhaltung zahlreicher Restriktionen. Wichtige Kriterien dabei sind Produktqualität, Minimierung von Energie- und Ressourcenverbrauch, Schadstoffvermeidung und Sicherheit. Umgekehrt bilden die immer komplexeren Prozesse und Lösungsanforderungen aus Industrie und Wirtschaft inzwischen eine der wichtigsten Triebkräfte für die aktuelle Grundlagenforschung in der Optimierung.

Die Idee des Industry-on-Campus-Konzepts des Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO) ist es, Forscher und Entwickler aus der Industrie mit den Methodenentwicklern an der Universität Heidelberg zusammenzubringen. Ein intensiver Austausch über Erfahrungen und Erwartungen soll dazu beitragen, frühzeitig den Forschungsbedarf für aktuell und künftig benötigte Methoden zu identifizieren und gemeinsame Forschungsprojekte zu initiieren. Rund achtzig Wissenschaftler aus elf Forschergruppen des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg (IWR) sind am HCO beteiligt. Sie arbeiten an gemeinsamen Projekten mit DAX-Unternehmen ebenso wie mit kleinen und mittelständischen Unternehmen, darunter ABB, BASF, Bayer, Daimler, DFS, EnBW, ESA, Lufthansa, Octapharma, Össur, Rockwell-Collins, SAP und TLK Energy. Neben konkreten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bestehen die Kooperationen in gemeinsamen Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen und in der Mitwirkung an den sogenannten Challenge Workshops und Netzwerkaktivitäten des nationalen Komitees für Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung (KoMSO).

<http://hco.iwr.uni-heidelberg.de>

CLEARING THE AIR

# OPTIMISATION MASTERS COMPLEXITY

EKATERINA KOSTINA

Mobility is essential in our everyday life – and in our internationally networked society, flying in particular has become an indispensable form of travel. In Germany alone, this results in more than 10,000 flights that take off, land or fly over national territory every day. The steady increase in air traffic, coupled with strict requirements regarding safety, efficiency, capacities and environmental protection, represents a formidable challenge to air traffic management. Mastering this challenge will require sophisticated methods of decision support, planning and control, which can only be developed based on innovative methods of mathematical modelling, simulation and optimisation (MSO).

In a joint project with the German Air Navigation Services (Deutsche Flugsicherung), my research group was the first to investigate the potential of applying modern direct methods of mathematical optimisation and optimal control to the core problem of air traffic control, the so-called separation management. This is the task of separating all aircraft in an allocated airspace as efficiently as possible in order to avoid conflict situations, something that can be modelled as a very large and complex optimal control problem with numerous state constraints. The results of the study are very promising and reveal an enormous potential of improving air traffic control. They also prove that mathematical methods can solve these very difficult problems reliably, in real time and with more efficiency than human controllers. Indeed, the methods safely resolve complex conflicts in separation management involving several aircraft. They maintain prescribed separation margins while requiring only minimal deviations from original flight plans. As an added bonus, they also lead to remarkable fuel savings of up to five per cent.

However, there are still many challenges to the mathematical methods that must be mastered before the vision of an automated reliable decision support system can become a reality. My group in collaboration with other research groups at the Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization are prepared to address these challenges. ●

PROF. DR EKATERINA KOSTINA is Professor of Numerical Analysis at Heidelberg University. After completing her university studies and PhD in mathematics in Minsk (Belarus), she accepted a position as research assistant at Heidelberg University's Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) in 1997. From 2006 to 2015 she held the Chair of Numerical Optimisation at the University of Marburg. She is a founding member of the national Committee for Mathematical Modeling, Simulation and Optimization (KoMSO). Prof. Kostina's research focuses on the development of numerical methods of non-linear optimisation and optimal control and their application to complex dynamic processes in science and technology. Along with colleagues from the IWR, she also contributes to the Heidelberg Collaboratory for Industrial Optimization (HCO).

Contact: [ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de](mailto:ekaterina.kostina@iwr.uni-heidelberg.de)

**“Our aim is to provide powerful decision support systems that are able to cope with the rapidly growing air traffic and can identify and solve conflicts automatically.”**

Ein weiterer großer qualitativer Unterschied zwischen mathematischer und menschlicher Konfliktbewältigung ist die ungleiche Verteilung der Lasten: Die Mathematik behandelt alle Flugzeuge prinzipiell gleich – menschliche Lotsen aber neigen dazu, bei der Lösung eines Problems einzelne Flugzeuge stärker als andere zu belasten. Die mathematische Lösung wird daher von den Piloten eher als „fair“ eingeschätzt und findet eine höhere Akzeptanz. Eine gleichmäßigere Verteilung hat darüber hinaus noch zwei weitere Vorteile: Erstens bewirken Kurskorrekturen, die notwendig werden, geringere Abweichungen von den nominellen Flugplänen – Fluglinien und Flugraumnutzer können dann effektiver vorausplanen, was die gesamte Planbarkeit des Flugverkehrssystems erhöht; zweitens entstehen seltener Dominoeffekte durch einzelne, besonders stark verspätete Flüge, die das gesamte System beeinträchtigen.

Wichtige positive Nebeneffekte unseres Ansatzes sind darüber hinaus, dass der niedrigere Flugwegüberschuss Treibstoff merklich einsparen lässt und weniger Korrekturmanöver notwendig macht. Im Durchschnitt können die Treibstoffeinsparungen der mathematischen gegenüber der menschlichen Lösung auf fünf Prozent geschätzt werden.

#### Ein Blick in die Zukunft

Ein mittelfristiges, auch von den Flugaufsichtsbehörden gewünschtes Ziel ist es, leistungsfähige Systeme zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen, die dem rapide zunehmenden Flugverkehr gewachsen sind und Konfliktsituationen automatisch erkennen und lösen. Derartige Systeme lassen sich nach unseren bisherigen Forschungsergebnissen nur auf der Basis innovativer Verfahren der modellgestützten Optimierung und optimalen Steuerung realisieren. Auf dem Weg dahin sind noch zahlreiche Hürden, auch mathematischer Art, zu nehmen. Einige der Herausforderungen, die künftig zu bewältigen sind, seien nachfolgend beschrieben. Wir haben sie auf einem sogenannten Challenge Workshop zum Thema „Mathematical MSO for Air Traffic Management“ herausgearbeitet, das kürzlich gemeinsam mit Lufthansa Systems stattfand.

Die bislang von uns berechneten optimalen Konfliktlösungen beruhen zunächst auf kontinuierlichen Kursänderungen. Die entsprechenden Korrekturen können aber bei der verbalen Kommunikation zwischen einem Fluglotsen und einem Piloten nur mit einem endlichen Repertoire von Kommandos übermittelt werden. Die Modellierung dieses Prozesses führt mathematisch auf das grundsätzlich viel schwierigere Problem der optimalen Steuerung mit „diskreten“ Entscheidungsvariablen: Hierfür müssen neue Methoden entwickelt werden, die etwa auf intelligenten Relaxierungen und auf Rundung beruhen.

Das Realisieren optimaler Konfliktlösungen birgt zahlreiche Fehlerquellen. So variieren die Modelle für die

verschiedenen Flugzeugtypen sehr stark. Hinzu kommt, dass die aktuelle Flugleistung von der abnehmenden Treibstoffmasse abhängt. Inputdaten, etwa der Eintritt des Flugzeugs in den Sektor, werden zudem ungenau und zeitversetzt übermittelt – wobei eine Zeitverzögerung von dreißig Sekunden bei einer Geschwindigkeit von 840 Kilometern pro Stunde bereits sieben Kilometer ausmacht. Auch das Umsetzen der Korrekturmanöver geschieht zeitversetzt. Solche Ungenauigkeiten und Unsicherheiten müssen bei der Optimierung von vornherein einkalkuliert und kompensiert werden. Dies führt auf Probleme der „robusten“ Optimierung – ein weiteres aktuelles Forschungsgebiet meiner Arbeitsgruppe.

Andere mögliche Fehlerquellen sind äußere Einflüsse und Störungen, die nicht vorherzusehen sind. Wind- und Wetterdaten beispielsweise können sich lokal schnell ändern und haben großen Einfluss auf die Flugdynamik. Dies zu berücksichtigen, erfordert nicht allein ein dichtes Datennetz. Notwendig ist es auch, die aktuelle Situation schnell und zuverlässig einzuschätzen und die optimale Lösung an die Störung mit echtzeitfähigen Methoden anzupassen („Feedback“). Bei der Entwicklung solcher Verfahren haben wir in den letzten Jahren bereits enorme Fortschritte erzielt.

Langfristig gesehen realisiert man den größten gesellschaftlichen Nutzen nur durch eine simultane Optimierung und optimale Steuerung zur antizipativen Flugplanung für alle Flugzeuge und Fluglinien über einen längeren Zeitraum und eine größere räumliche Ausdehnung. Auch Sicherheit, Komfort, Umweltkonsequenzen und Kosten sind dabei zu berücksichtigen. Wegen der stets möglichen Störungen ist dies nur mit einem Optimierungsverfahren vorstellbar, das echtzeitfähig und robust ist und räumliche und zeitlich lokale Konflikte auflösen kann.

Ein solcher strategischer Ansatz wird derzeit diskutiert. Er setzt voraus, dass Flugplanung und Flugsicherung weitgehend reorganisiert werden und eine aufwendige Informations- und Kommunikationstechnik vorhanden ist. Echte Durchbrüche für den Flugverkehr der Zukunft hängen allerdings in erster Linie davon ab, dass auf dem Gebiet der mathematischen Verfahren zur Optimierung und optimalen Steuerung Fortschritte erzielt werden. Nur dann lassen sich Probleme solcher Komplexität lösen – wir arbeiten daran. ●

**„Unser Ziel ist es, leistungsfähige Systeme zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen, die dem rapide wachsenden Flugverkehr gewachsen sind und Konfliktsituationen automatisch lösen.“**



SUCHTFORSCHUNG  
**IMMER WIEDER AUFHÖREN**  
WEGE AUS DER SUCHT  
FALK KIEFER

**78**



NEUROWISSENSCHAFTEN  
**LERNEN UND VERGESSEN**  
VON FLIEGEN UND MENSCHEN  
CHRISTOPH SCHUSTER

**86**



MEDIZINISCHE PSYCHOLOGIE  
**KEIN HALTEN MEHR**  
WENN STRESS KRANK MACHT  
BEATE DITZEN & MARTIN STOFFEL

**94**



PHARMAKOLOGIE  
**ÜBERREIZTE NERVEN**  
EIN MOLEKÜL BREMST DEN SCHMERZ AUS  
JAN SIEMENS

**102**

# HOCHSPRUNG







STOP  
&  
GO  
HOCH-  
SPRUNG

IMMER WIEDER AUFHÖREN  
IMMER WIEDER AUFHÖREN  
IMMER WIEDER AUFHÖREN

IMMER WIEDER AUFHÖREN

# WEGE AUS DER SUCHT

FALK KIEFER

**Aktuelle Erkenntnisse zu den Mechanismen süchtigen Verhaltens ermöglichen es, Phänomene der selektiven Wahrnehmung, Präferenz und Willensfreiheit in einem neuen Kontext zu sehen. Das Ziel der modernen Suchtbehandlung ist die Nutzung dieser Erkenntnisse, um die Betroffenen mit individualisierten Therapieverfahren darin zu unterstützen, sich aus ihrer auf das Suchtmittel ausgerichteten Erlebniswelt zu befreien.**



**“It’s easy to quit smoking.  
I’ve done it  
a thousand times.”**

**Mark Twain**

Aufhören und wieder anfangen – man kann auch das Anfangen beenden und mit dem Aufhören beginnen. Die Dialektik beider Alternativen beschreibt den phänomenologischen Kern von Suchterkrankungen. In dem Moment, in dem es innere oder äußere Faktoren notwendig machen, das Verhalten zu ändern, wird die „Abhängigkeit“ offenbar: Es gelingt den Betroffenen nicht oder nur sehr schwer, das den Alltag prägende Verhalten nachhaltig zu ändern. Aus „Choice“ – der aktiven Entscheidung für

Tabak, Alkohol oder eine andere Droge – ist „Habit“ geworden, die steuernde Gewohnheit, die über unbewusste Präferenzen und automatisierte Handlungsabläufe das Verhalten im Alltag bestimmt.

Nicht mehr die Entscheidung für den Konsum steuert das Suchtverhalten. Stattdessen läuft das Suchtverhalten weitgehend autonom in einem Umfeld, das auf den Konsum abgestimmt ist. Allein die aktive Entscheidung gegen den Konsum, die immer wieder neu getroffen werden muss, kann das Verhalten ändern. Entsprechend definieren sich Suchterkrankungen nicht darüber, wie häufig oder in welchem Umfang Suchtmittel konsumiert werden. Die Erkrankung definiert vielmehr, wie sich das Leben und der Alltag der Betroffenen immer enger um den Suchtmittelgebrauch ausbilden, wie Handlungsalternativen immer weniger wahrgenommen werden und wie das als schädigend erkannte Verhalten trotz immer drängender werdender negativer Konsequenzen nur für kurze Zeit eingestellt werden kann – meist so lange, wie der Problemdruck eine aktive und bewusste Kontrolle des Verhaltens erzwingt.

Suchtmittel scheinen Umgebungsfaktoren (Dingen, Menschen, Situationen), die mit ihrem Konsum verknüpft sind, subjektive Relevanz zu verleihen. Das geht auf Kosten jener Faktoren, die diese Relevanz nicht herstellen können. Ähnlich einem Google-Algorithmus, in dem

# „Suchterkrankungen definieren sich nicht darüber, wie häufig oder in welchem Umfang Suchtmittel konsumiert werden, sondern wie sehr sie das Leben und den Alltag der Betroffenen bestimmen.“

Bewertungsfaktoren Informationen hierarchisieren, steigen durch die Einnahme eines Suchtmittels bestimmte Umgebungsinformationen in der Liste, die unsere Kognition bearbeitet, ganz nach oben. Hier wie dort wird das System selbstreferenziell: Die subjektive Welt eines süchtigen Menschen verengt sich immer weiter auf alles, was einen gelernten Bezug zum Suchtmittel besitzt. Das Suchtmittel wird prioritär kognitiv verarbeitet und in der Handlungsplanung bevorzugt, was wiederum seine Relevanz steigert.

Damit wird deutlich, dass sich Süchte in ihrer Psychopathologie grundsätzlich von Zwängen unterscheiden. Zwänge sind „ich-dyston“: Das ausgeübte Verhalten, etwa ein Wasch- oder Kontrollzwang, wird vom Betroffenen meist als unsinnig erkannt, muss aber dennoch ausgeführt werden, um Ängste zu unterdrücken. Bei Süchten ist das Verhalten in der Regel „ich-synton“: Zum Zeitpunkt der Entscheidung für den Konsum von Alkohol oder Drogen befindet sich der Patient subjektiv in einer Welt, in welcher der Konsum des Suchtmittels die am höchsten priorisierte Handlungsalternative ist. Zuvor mit großer Einsicht geplante Änderungen des Verhaltens sind in solchen Situationen plötzlich nicht mehr abrufbar.

Unsere Studien im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 636 der Universität Heidelberg zum Thema „Lernen, Gedächtnis und Plastizität des Gehirns“ konnten diese Zusammenhänge mit Daten belegen: Visuelle Reize, die

mit dem Suchtmittel verknüpft waren – ein Feuerzeug, eine Flasche Wein, Bilder von Partys oder Clubs –, wurden von tabak-, alkohol- oder drogenabhängigen Patienten in unseren Untersuchungen bevorzugt kognitiv verarbeitet und schneller in die Handlungsplanung einbezogen. In ergänzenden Untersuchungen mit der funktionellen Kernspintomographie, einem bildgebenden Verfahren, war dieses selektive Verarbeiten von Reizen deutlich mit der erhöhten Aktivität einer evolutionär alten Hirnregion verknüpft: dem „mesolimbischen Belohnungssystem“.

**„... da war's um ihn geschehn;  
halb zog sie ihn, halb  
sank er hin und ward nicht  
mehr gesehn.“**

**Johann Wolfgang von Goethe**

Sexualität, Nahrung, Geldgewinn oder menschliche Zuwendung wirken als natürliche Verstärker – unsere Kultur nutzt sie selbstverständlich, um Verhalten zu lenken. Menschen können von diesen Verstärkern gefangen sein und ihnen Denken und Handeln weitgehend unterordnen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Nervenbotenstoff

(Neurotransmitter) Dopamin und zu seiner Bedeutung für das Verarbeiten von Reizen, die mit Belohnung assoziiert sind, haben für das Verständnis von Suchterkrankungen eine entscheidende Rolle gespielt. Grundsätzlich geht ein belohnungsassoziiertes Verhalten mit einer direkten oder indirekten Erhöhung der synaptischen Dopaminmenge im „Nucleus accumbens“, einer Struktur im unteren Vorderhirn, einher. Die Erhöhung der Dopaminmenge ist der pharmakologische „Klasseneffekt“ aller Suchtstoffe. Aber welche Informationen werden durch die Freisetzung von Dopamin und die sich anschließende weitere Verarbeitung des Signals codiert?

Es gibt gute Belege dafür, dass der Neurotransmitter Dopamin als ein Signal fungiert, das Belohnungen bewertet und markiert sowie die Aufmerksamkeit lenkt. Unsere gemeinsam mit dem Institut für Psychopharmakologie des Mannheimer Zentralinstituts für Seelische Gesundheit durchgeführten Studien zur Rolle von Dopamin zeigen klare Effekte von Suchtstoffen auf belohnungsassoziiertes Lernen und Präferenzverhalten. Um Organismen zu ermöglichen, ihr Verhalten auf die Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Belohnung auszurichten, bedarf es eines Bewertungssystems für stattgehabte Belohnungen sowie eine Vorhersage zukünftiger Belohnungen. Diese Markierungsfunktion scheint eng mit dem mesolimbischen Belohnungssystem verknüpft zu sein. Demnach wird eine Belohnung, die „besser als erwartet“ ausfällt, mit einem phasischen Anstieg der Dopaminfreisetzung codiert (positiver Vorhersagefehler für Belohnungsereignisse) und eine „schlechter als erwartete“ Belohnung mit einer phasischen Abnahme (negativer Vorhersagefehler für Belohnungsereignisse).

Basierend auf den Lernmodellen zu positiven und negativen Vorhersagefehlern wird deutlich: Drogen besitzen aufgrund ihrer pharmakologischen Eigenschaften einen entscheidenden Vorteil gegenüber natürlichen Verstärkern. Indem sie einen Anstieg der Dopaminfreisetzung erzwingen, wird immer das Signal „besser als erwartet“ erzeugt, unabhängig vom subjektiven Effekt des jeweiligen Suchtmittels. Dies führt dazu, dass Hinweisreize, die mit diesem Signal einhergehen, aus dem „Rauschen der Umgebung“ herausgefiltert, als relevant eingestuft und bevorzugt verarbeitet werden. Letztlich bleibt ungeklärt, ob die Dopaminfreisetzung selbst die Filter- und Signalfunktion innehat, oder ob diese von anderen neuronalen Systemen verursacht und durch Dopamin nur repräsentiert wird. In den oben genannten Studien konnte aber gezeigt werden, dass Dopamin beim Lernen durch Belohnung zu einer erhöhten Leistung führt, eine Blockade der Dopaminfreisetzung hingegen die Gedächtnisbildung verschlechtert.

Dopamin ist also eng in die konditionierten Verstärkungsprozesse eingebunden und zeichnet damit wesentlich für das „Go“ (zunehmende Präferenz) verantwortlich. Das fortgeschrittene Stadium von Suchterkrankungen („Habit“)

wird zusätzlich durch eine verminderte Fähigkeit zum „Stop“ (abnehmende Kontrolle) gekennzeichnet. Die abnehmende Kontrolle scheint von Nervenzellen im präfrontalen Kortex abzuhängen, die Glutamat als Neurotransmitter freisetzen (glutamaterge Neurone). Dies haben wir während unserer Studien im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Nationalen Genomforschungsnetzes zeigen können. Betrachtet man alle Untersuchungsergebnisse gemeinsam, lässt sich Folgendes schlussfolgern: Dauerhafte synaptische Veränderungen glutamaterger Neurone – also der Kontaktstellen

### **Weltweit anerkanntes Zentrum moderner Psychiatrie**

Das Zentralinstitut für Seelische Gesundheit (ZI) in Mannheim verzahnt Krankenversorgung, Forschung und Lehre im Bereich psychischer Störungen. Mit dieser Zielsetzung wurde es im Mai 1975 als Landesstiftung des öffentlichen Rechts mit Mitteln des Bundes, des Landes Baden-Württemberg und der VolkswagenStiftung gegründet. In den vier Kliniken des Instituts werden jährlich über 3.000 psychisch kranke Menschen mit modernsten Therapiemethoden stationär und teilstationär behandelt. Gleichzeitig ist das Institut ein weltweit anerkanntes Zentrum innovativer Psychiatrieforschung; es ist eng mit der Universität Heidelberg verknüpft und pflegt zahlreiche wissenschaftliche Kooperationen mit nationalen und internationalen Einrichtungen. Die am Zentralinstitut für Seelische Gesundheit tätigen Professoren werden von der Universität Heidelberg unter Beteiligung des Zentralinstituts berufen. Sie sind Mitglieder der Universität und erfüllen Lehraufträge an den Medizinischen Fakultäten der Ruperto Carola sowie an anderen universitären Einrichtungen in der Region.

Die Forscher der Klinik für Abhängiges Verhalten und Suchtmedizin am ZI haben es sich zur Aufgabe gemacht, neue Behandlungsmöglichkeiten für Suchterkrankungen zu entwickeln und vorhandene Therapien zu verbessern. Vorrangiges Ziel ist es, psychotherapeutische und pharmakologische Wirkmechanismen zu identifizieren, zu personalisieren und zu etablieren. Voraussetzung hierzu ist ein tiefgehendes Verständnis der Prozesse, die in eine Abhängigkeit hineinführen und diese aufrechterhalten: (Epi-)Genetik, molekulare Mechanismen sowie kognitive und emotionale Prozesse, die gleichzeitig die Basis für die Entwicklung einer „Precision Medicine“ darstellen. Dies erfolgt aktuell unter anderem in den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Programmen „Netzwerk psychische Gesundheit: AERIAL, SysMed Alcoholism“ und im „Horizon 2020“-Rahmenprogramm der EU.

[www.zi-mannheim.de](http://www.zi-mannheim.de)

# „Die subjektive Welt eines süchtigen Menschen verengt sich immer mehr auf das, was einen gelernten Bezug zum Suchtmittel besitzt.“

zwischen den Nervenzellen – im präfrontalen Kortex und dem mesolimbischen Belohnungssystem tragen wesentlich zum fokussierten Suchtverhalten und zu der Unterbewertung natürlicher Verstärker bei.

**„... der Mensch kann tun, was er will, aber er kann nicht wollen, was er will ...“**

**Arthur Schopenhauer**

Unter dem Einfluss der pharmakologischen Wirkung von Suchtstoffen werden alternative, nicht mit dem Suchtmittelkonsum assoziierte Informationen immer weniger wahrgenommen und immer weniger handlungswirksam. Ein naheliegender Weg, die dominante Rolle suchtassoziierter Hinweisreize zu schwächen, besteht darin, Reiz und Verstärker zu entkoppeln. Abstinenz ist hierzu der klassische Schlüssel: Die Konfrontation mit suchtassoziierten Stimuli erfolgt – die Verstärkung aber (zum Beispiel der Konsum von Alkohol) bleibt aus. Ist die Belohnungsvorhersage fehlerhaft, korrigiert das lernfähige Gehirn den Wert der Vorhersage: Andauernde Exposition bei ausbleibender Verstärkung führt zur Extinktion (Löschung).

Abstinenz, ursprünglich als Therapieziel gesetzt, ist damit therapeutisches Mittel. Sie ermöglicht die Korrektur automatisierter, impliziter kognitiver Verarbeitungsmuster

nach der Präsentation suchtassoziierter Hinweisreize. Mit bildgebenden Verfahren konnten wir dies im Rahmen des Sonderforschungsbereichs zeigen: Bereits neun einstündige Expositionssitzungen bei frühabstinenten alkoholabhängigen Patienten reichen aus, die neuronale Antwort auf Alkoholreize im Belohnungssystem des Gehirns deutlich zu mindern. Wurde dieses Training durch „D-Cycloserin“ unterstützt – eine Substanz, welche die Gedächtniskonsolidierung fördert –, erhöhte sich der Lerneffekt des Trainings, und die Minderung der neuronalen Reizreaktivität war noch ausgeprägter.

Ein alternativer Weg, die Belohnungsvorhersage zu modifizieren, ist aktives Umlernen. Ein Therapieverfahren, das wir derzeit gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Praktische Informatik der Universität Mannheim entwickeln, zielt auf ein „Re-Training“ der stimulusabhängigen Fokussierung der Aufmerksamkeit ab: Die Patienten lernen mithilfe eines computerbasierten Programms („Serious Game“), sich nicht dem gelernten „belohnungsassoziierten“ Stimulus anzunähern, sondern sich alternativen Reizen zuzuwenden, die durch die Spielsituation verstärkt werden.

Die beschriebenen Ansätze beinhalten ein „Training“ und fokussieren damit auf eine aktive und extern vermittelte Modifikation des Verhaltens, um in einem zweiten Schritt die Wahrnehmung für andere Informationen der Umgebung öffnen zu können. Eine andere Therapieoption stellen achtsamkeitsbasierte Verfahren dar. Diese setzen unmittelbar an einer Erweiterung der Wahrnehmung und einer



**PROF. DR. FALK KIEFER** studierte Medizin an der Universität Erlangen, wo er auch seinen Dokortitel erlangte. Anschließend absolvierte er seine psychiatrisch-psychotherapeutische Facharztweiterbildung an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie sowie an der Neurologischen Klinik des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf, wo er 2004 habilitierte. Im Jahr 2005 erhielt er einen Ruf der Universität Heidelberg auf eine Professur für Psychiatrie und Psychotherapie. 2016 übernahm er den Lehrstuhl für Suchtforschung verbunden mit der Position des Ärztlichen Direktors der Klinik für Abhängiges Verhalten und Suchtmedizin am Zentralinstitut für Seelische Gesundheit (ZI) in Mannheim. Für seine wissenschaftlichen Arbeiten wurde Falk Kiefer mehrfach mit renommierten Preisen ausgezeichnet.

Kontakt: [falk.kiefer@zi-mannheim.de](mailto:falk.kiefer@zi-mannheim.de)

STOPPING OVER AND OVER AGAIN

# OVERCOMING ADDICTION

FALK KIEFER

Recent data on the neurobiology of addictive behaviours allow new insights into the pathophysiology of selective attention, preference, and decision making. During the process of becoming addicted, and due to the reinforcing action of addictive compounds, drug-associated stimuli gain subjective relevance: The world of an addicted person narrows down to anything that, in the addict's experience, has a connection to the addictive compound. The drug of choice is prioritised in the addict's cognitive processes and preferred in action planning, which increases its relevance. Addictive behaviour thus dominates day-to-day life, making it very difficult, or even impossible, to overcome. 'Choice' – the active decision to consume tobacco, alcohol or another drug – becomes 'habit', a pattern that controls the addict's behaviour via subconscious preferences and automated actions.

We were able to show that extinction training, attentional retraining, neurofeedback therapy and mindfulness-based interventions help addicted persons to reduce their cue-reactivity in response to drug-associated stimuli. They regain control over drug-associated habits and open their mind to an environment not linked with or reinforced by drugs or addictive behaviours. Therapies aiming at extinguishing the neuronal response to drug-associated stimuli and mindfulness-based interventions are both modulated in their effectiveness by personal characteristics. Improving our understanding of how these characteristics impact therapy, weighing them and using them to develop custom-made interventions within the concept of 'precision medicine' will be the focus of our research in coming years. We want to support patients in their attempt to stop ploughing on and sharpen their awareness of a world beyond the self-limiting existence that is substance addiction. ●

PROF. DR FALK KIEFER studied medicine and earned his doctor's degree at the University of Erlangen. He went on to train as a psychiatrist and psychotherapist at the Department of Psychiatry and Psychotherapy and the Department of Neurology of the University Medical Center Hamburg-Eppendorf, where he completed his habilitation in 2004. In 2005 he joined Heidelberg University as Professor of Psychiatry and Psychotherapy, and in 2016 accepted the Chair of Addiction Research and the position of Medical Director of the Department of Addictive Behaviour and Addiction Medicine at Mannheim's Central Institute of Mental Health (ZI). Falk Kiefer has received several prestigious awards for his scientific work.

Contact: falk.kiefer@  
zi-mannheim.de

**“The subjective world of an addicted person narrows down to anything that, in the addict’s experience, has a connection to the addictive compound.”**

# „Mithilfe eines Neurofeedback-Trainings konnten Versuchsteilnehmer innerhalb kurzer Zeit lernen, ihre Reaktion auf Suchtreize aktiv herunterzuregulieren.“

Öffnung für alternative Handlungsoptionen an. Sich beschränkenden Gewohnheiten und Bedürfnissen zu entziehen, von ihnen frei zu werden, ist ein essenzieller Bestandteil menschlichen Erlebens und Handelns. Freiheit meint dabei nicht die Freiheit von Handlungszwängen, sondern die Freiheit, Handlungsoptionen möglichst weitgehend ohne beschränkende Verarbeitungsmuster wahrzunehmen und sich einer Handlungsoption bewusst zuwenden zu können.

Kann der (süchtige) Mensch diese Fähigkeit nutzen, um Umgebungsreize und Handlungsmotive einer ansatzweise subjektfernen Bewertung zu unterziehen und gegebenenfalls gegen seine initiale Präferenz zu handeln? Eine Therapie, die auf Achtsamkeit basiert, richtet die Aufmerksamkeit konzentriert auf die im Moment wahrnehmbaren Sinnesindrücke und Empfindungen. Damit rührt sie am Kern der oben beschriebenen „Tunnelblick“-Pathophysiologie der Sucht: Sie ermutigt den Menschen, seine einzigartige Fähigkeit der (Selbst-)Reflexion zu nutzen und sich gegen implizite Reaktionsmuster zu verhalten, die Aufmerksamkeit nicht ausschließlich auf die Motive der gelernten Präferenz zu richten, sondern Informationen unbenommen von ihrer Beziehung zu Gewohnheiten und Handlungsimpulsen aufzufassen und in einer Willenshandlung Verantwortung für die eigene Entscheidung zu übernehmen (im Sinne einer „Existenzherstellung“ nach Karl Jaspers). Im natürlichen Verlauf der Suchterkrankungen entsteht Achtsamkeit meist erst in „Grenzsituationen“. Ziel der Therapie ist es, Achtsamkeit in das Alltagsleben zu integrieren.

Dass es Suchtpatienten grundsätzlich möglich ist, die Reizreaktivität ihres mesolimbischen Belohnungssystems unter Kontrolle zu bekommen, konnten wir kürzlich in einem Projekt zeigen, das wir gemeinsam mit der Abteilung Klinische Psychologie des Zentralinstituts für Seelische Gesundheit im Rahmen eines „Horizon 2020“-Projekts der EU durchführten: Mithilfe eines Neurofeedback-Trainings, bei dem der gegenwärtige Aktivierungsgrad des mesolimbischen Belohnungssystems rückgemeldet wird – in diesem Fall während der Präsentation von Alkoholareizen –, konnten Probanden innerhalb kurzer Zeit lernen, ihre Reizreaktivität aktiv herunterzuregulieren.

Sowohl Therapien, die auf die Auslöschung der neuronalen Antwort auf den Suchtreiz abzielen, als auch achtsamkeitsbasierte Verfahren werden in ihrer Wirksamkeit durch individuelle Charakteristika moduliert. Diese in ihrer Bedeutung für den Therapieverlauf besser zu verstehen, zu gewichten und gezielt im Sinne einer „Precision Medicine“ anzusprechen, ist zentrales Anliegen unserer Forschungsaktivitäten der kommenden Jahre – um Patienten darin zu unterstützen, das Weitermachen zu beenden und zu beginnen, die Wahrnehmung für eine Welt jenseits süchtiger Selbstbeschränkung zu öffnen. ●

# LERNEN UND VERGESSEN



LERNEN UND VERGESSEN

# VON FLIEGEN UND MENSCHEN

CHRISTOPH SCHUSTER

**Lernen ermöglicht es, sich zu erinnern und mit künftigen Ereignissen besser umzugehen: Erinnerungen bewahren uns vor Unglück, erhöhen unsere Überlebenschancen, lassen uns Zusammenhänge erkennen und fördern unser Wissen. Aber unser Gedächtnis ist nicht perfekt. Manche Ereignisse erinnern wir unvollständig oder wir vergessen sie ganz; andere lassen uns nicht los – und belasten uns ein Leben lang. Untersuchungen zu den Grundlagen der Gedächtnisbildung zeigen verblüffende Gemeinsamkeiten zwischen Fliegen und Menschen. Die neuen Erkenntnisse bereiten den Weg, um psychische Erkrankungen des Menschen zu behandeln und das lebenslange Wiederaufleben traumatischer Ereignisse zu verhindern.**

# D

„Das Leben ist nicht das, was man gelebt hat, sondern das, woran man sich erinnert und wie man sich daran erinnert – um davon zu erzählen.“ Was Gabriel García Márquez in seinen im Jahr 2002 erschienenen Memoiren festhält, hat er in fiktiver Weise bereits 1967 in seinem ersten Roman „Hundert Jahre Einsamkeit“ beschrieben. Dort lässt der Literaturnobelpreisträger die Bewohner eines einsamen Dorfes einer rätselhaften Seuche anheimfallen, die sie in eine unüberwindbare Schlaflosigkeit zwingt. Entscheidend für das menschliche Dasein ist nach den Beschreibungen von Márquez allerdings nicht die Schlaflosigkeit selbst, sondern der mit ihr unvermeidlich einhergehende Verlust des Gedächtnisses: Die Dorfbewohner verlieren die Erinnerungen an ihre Kindheit, sie vergessen die Namen von Alltagsgegenständen und wie sie funktionieren, sie wissen nicht mehr, was die Worte bedeuten. Über den Verlust von Wissen, Sprache und Identität, über das Verlernen der motorischen Fähigkeiten und die Probleme beim Erkennen von Mitmenschen entgleitet den Menschen das Leben in ein absurd anmutendes, schließlich tödlich endendes Dasein ohne Vergangenheit.

Zwanzig Jahre nach dem Erscheinen von „Hundert Jahre Einsamkeit“ beschrieb der italienische Neurologe Elio Lugaresi erstmals eine Erkrankung, die in den meisten Aspekten mit den Schilderungen von Márquez übereinstimmt. Sie wird heute „tödliche familiäre Schlaflosigkeit“ genannt. Heute weiß man, dass das Schlafen eine entscheidende Rolle bei der Konsolidierung von Gedächtnisinhalten spielt: Neu erlernte Gedächtnissequenzen werden im Schlaf in komprimierter Form aus einem labilen Speicher ausgelesen und in weit verstreuten Arealen der Hirnrinde langfristig verankert. Der Entzug von Schlaf verhindert diese wichtigen Vorgänge und unterbindet das Entstehen und die Instandhaltung des Langzeitgedächtnisses. Die Fähigkeit zu lernen und die Fähigkeit, das Erlernte so abzuspeichern, dass es im richtigen Moment wieder abgerufen werden kann, scheint eine Grundvoraussetzung unserer Überlebenskompetenz zu sein.

Rechtfertigten diese Beobachtungen den umgekehrten Schluss, dass die Lebenskompetenz steigt, je stärker und präsenter Gedächtnisinhalte sind? Auch hier hat die Literatur Antworten gefunden – lange bevor wissenschaftliche

# „Das Leben ist nicht das, was man gelebt hat, sondern das, woran man sich erinnert.“

Gabriel García Márquez

Erkenntnisse unser heutiges Wissen formten. Viele Autoren von der Antike bis in die Neuzeit berichteten in ihren Werken, wie sich schreckliche Kriegs- oder Katastrophenerebnisse auf das Leben der Betroffenen und ihr Handeln auswirken. Der mächtige Krieger Aias in Homers Werk „Ilias“ etwa oder Shakespeares König Heinrich IV. erfüllen die meisten diagnostischen Kriterien einer Krankheit, die seit dem Jahr 1980 als „Posttraumatische Belastungsstörung“ bezeichnet wird. Sie kann durch das Erleben eines oder mehrerer traumatischer Ereignisse ausgelöst werden und äußert sich beispielsweise in belastenden Erinnerungen, die den Alltag dominieren, in traumatischen Alpträumen oder im halluzinatorischen Wiedererleben der schrecklichen Ereignisse. Ein Zuviel an Erinnerung ist offensichtlich auch nicht hilfreich.

Lernen und Vergessen – das sind zwei grundlegende Funktionen unseres Gehirns. Sie sind notwendig, damit sich unser Verhalten kontinuierlich an Bedingungen anpassen kann, die sich dynamisch verändern. Ebenso unerlässlich sind Lernen und Vergessen, um mit ähnlichen oder verändert wiederkehrenden Ereignissen optimal umgehen zu können. Dazu muss unser Gehirn neue Informationen und Zusammenhänge abspeichern und im Bedarfsfall wieder aufrufen. Darüber hinaus muss das Gedächtnis aktualisierbar sein, falls andere Zusammenhänge entstehen oder sich Bedeutungen zwischenzeitlich geändert haben. Geraten diese Funktionen außer Balance oder im Extremfall außer Kontrolle, kann es für die Betroffenen krankhafte oder gar tödliche Konsequenzen haben.

Wie aber werden die lebenswichtigen Funktionen des Lernens und Vergessens in den neuronalen Netzwerken unseres Gehirns realisiert? Auf diese Frage gibt es trotz intensiver Forschung bis heute keine zufriedenstellende Antwort. Ein Grund dafür ist die überwältigende Komplexität unseres Gehirns, das aus mehr als einer Billion Nervenzellen (Neurone) und rund einer Billiarde Synapsen, den entscheidenden Kommunikationskontakten der Neurone, besteht. Synapsen nutzen zudem unterschiedliche Botenstoffe, um unter verschiedenen Vorzeichen und in unterschiedlichen Zeitfenstern mit den nachgeschalteten Zellen zu kommunizieren.

## Vom Einfachen zum Besonderen

Wie kann es trotz dieser Komplexität gelingen, grundlegende Funktionsprinzipien des menschlichen Gehirns zu verstehen? Eine vielfach bestätigte Hypothese geht davon aus, dass im Laufe der Evolution einmal entstandene erfolgreiche Funktionsprinzipien eher erhalten („konserviert“) und verbessert werden, als dass sie aufgegeben und durch gänzlich neue Funktionsprinzipien ersetzt würden. Auf dieser Annahme beruht der sogenannte reduktionistische Forschungsansatz, der Zusammenhänge an einfachen Organismen untersucht, um Hinweise auf die Funktions-

weise bei komplexeren Organismen wie dem Menschen zu erhalten. Beispiele für solch einfache Modellsysteme sind der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* (rund 300 Neurone) oder die Meeresschnecke *Aplysia californica* (etwa 20.000 Neurone).

Grundsätzliche molekulare und zelluläre Mechanismen basaler Lernprozesse konnten mit Untersuchungen an diesen vergleichsweise einfachen Organismen aufgedeckt

### Weltweit herausragendes Zentrum

Das Interdisziplinäre Zentrum für Neurowissenschaften, kurz IZN, wurde im Jahr 2000 an der Universität Heidelberg gegründet. Ziel des Fakultäten und Institutionen vernetzenden Forschungszentrums ist es, die im Raum Heidelberg und Mannheim konzentrierte neurowissenschaftliche Grundlagenforschung sowie die angewandte und klinische Forschung zu bündeln. Das IZN bietet hierzu eine Plattform des wissenschaftlichen Austausches; es will den Technologietransfer fördern und Kooperationen stimulieren. Darüber hinaus garantiert es eine hochwertige Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses mit seinem „Major Neurosciences“-Studiengang und dem IZN-Doktorandenprogramm. Neben der Universität und dem Universitätsklinikum Heidelberg sind folgende Einrichtungen am IZN beteiligt: die Universitätsmedizin Mannheim, das Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung, das Deutsche Krebsforschungszentrum (DKFZ), das Europäische Molekularbiologie Laboratorium (EMBL), das Zentralinstitut für Seelische Gesundheit (ZI) und die Hochschule Mannheim.

Derzeit gehören dem Zentrum 62 Forschergruppen an. Die Wissenschaftler engagieren sich in lokalen, nationalen und internationalen Verbänden wie dem Exzellenzcluster CellNetworks, den Sonderforschungsbereichen „Von Schmerz Wahrnehmung zu chronischem Schmerz“ und „Funktionelle Ensembles“ sowie dem Bernstein Zentrum für Computationale Neurowissenschaften. Für den Erfolg der Forschungsarbeiten am IZN liegen zahlreiche Belege vor: Allein sechs Wissenschaftler des Zentrums haben die renommierte „ERC Advanced Grant“-Förderung des European Research Council (ERC) erhalten. Nach einem aktuellen Ranking der „Best Global Universities 2016“ der amerikanischen „News Education“-Redaktion wurden die Forschungsaktivitäten der Universität Heidelberg im Bereich „Neurowissenschaften und Verhalten“ auf den ersten Platz in Deutschland und unter den Top 10 (Platz 7) in Europa eingestuft.

[www.izn.uni-heidelberg.de](http://www.izn.uni-heidelberg.de)

werden. Sie sind jedoch wenig geeignet, um höhere Organisations- und Funktionsprinzipien der Gedächtnisbildung und Gedächtnismodulation zu hinterfragen. Wie etwa entsteht das komplexe Trauma-Gedächtnis, und wieso kann es andere Gedächtnisformen teilweise lebenslang dominieren? Für solche Untersuchungen kommen nur Organismen mit Gedächtnisphänomenen infrage, die denen von Menschen zumindest ähneln. Wir haben deshalb vor einigen Jahren damit begonnen, das Lern- und Erinnerungsverhalten der Taufliege *Drosophila melanogaster* (knapp 100.000 Neurone) auf mögliche Parallelen zum Trauma-Gedächtnis des Menschen zu untersuchen. Das überraschende Ergebnis vorweg: Fast alle Gedächtnisphänomene traumatisierter Menschen sind auch bei Taufliegen zu beobachten.

Während unserer Untersuchungen trainieren wir den Fliegen über eine Duft-Schock-Kombination – unserem experimentellen Trauma-Äquivalent – zunächst ein Langzeitgedächtnis an. Es zeigte sich, dass dieses Langzeitgedächtnis der Fliegen nicht – wie bislang geglaubt – innerhalb einer Woche nach der Duft-Schock-Konditionierung verfällt: Es bleibt lebenslang im Fliegenhirn verankert und kann jederzeit wieder reaktiviert werden. Durch diese Entdeckung wurde es erstmals möglich, „traumatisierte“ Fliegen einer sogenannten Auslöschungstherapie zu unterziehen. Das Ergebnis: Mit der Therapie lässt sich bei Fliegen – wie bei Menschen – lediglich eine vorübergehende Auslöschung der traumatischen Erinnerungen bewirken. Eine spontane oder absichtlich herbeigeführte Reaktivierung kann die Trauma-Erinnerung jederzeit wiederherstellen und einen Rückfall in traumabedingte Verhaltensweisen hervorrufen.

So sehr diese und andere unerwarteten Parallelen des Trauma-Gedächtnisses von Mensch und Fliege verblüffen mögen, sie unterstreichen eine wichtige Erkenntnis: Bedeutende Informationen werden evolutionsübergreifend auf prinzipiell ähnliche Weise erlernt, abgespeichert und wieder aufgerufen. Bemerkenswert ist auch, dass ein Vergessen im Sinne der tatsächlichen Auslöschung eines Gedächtnisinhaltes beim Trauma-Gedächtnis offenbar nicht vorgesehen ist: Vergessen muss hier vielmehr verstanden werden als ein vorübergehend verschlossener Zugang zu abgespeicherten traumatischen Informationen.

### Gedächtnispfaden auf der Spur

Die vergleichsweise übersichtliche Anzahl der Nervenzellen des Fliegenhirns ermöglicht es, den aktiv lernenden Neuronen im Gehirn zuzuschauen. Auf diese Weise ist es uns gelungen, zwei Zellen zu identifizieren, die sich jeweils in einer Hälfte des Fliegenhirns befinden und entscheidende Rollen beim Aufbau aller bisher beschriebenen Gedächtnis Spuren spielen. Beide Neurone schütten dazu unterschiedliche Botenstoffe aus und sorgen im Lernzentrum des Fliegenhirns dafür, dass sich zwei verschiedene



**PROF. DR. CHRISTOPH SCHUSTER** ist seit dem Jahr 2004 Professor für Neurobiologie der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Biologie in Erlangen/Nürnberg und Heidelberg fertigte er seine Dissertation am hiesigen Zentrum für Molekularbiologie sowie am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt am Main an. Anschließend führte ihn ein Forschungsaufenthalt an die Universität von Kalifornien in Berkeley, USA, bevor er auf eine unabhängige Gruppenleiterposition am Friedrich-Miescher-Laboratorium der Max-Planck-Gesellschaft in Tübingen berufen wurde. Christoph Schuster ist Mitglied der Direktorien des Interdisziplinären Zentrums für Neurowissenschaften (IZN) der Universität Heidelberg sowie des Bernstein-Zentrums für Computationale Neurowissenschaften, einer Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Mechanismen der Gedächtnisentstehung und die Grundlagen psychischer Erkrankungen. Er wurde mit dem Heinz Maier-Leibnitz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgezeichnet und im Rahmen des Exzellenzprogramms Neurowissenschaften der gemeinnützigen Hertie-Stiftung gefördert.

Kontakt: [schuster@nbio.uni-heidelberg.de](mailto:schuster@nbio.uni-heidelberg.de)

# „Lernen und Vergessen sind zwei grundlegende und lebenswichtige Funktionen des Gehirns.“

Gedächtniskanäle öffnen. Die Botenstoffe „Serotonin“ und „Octopamin“ sind dabei die Schlüssel und Türöffner eines einfachen Gedächtniskanals: Er soll möglicherweise garantieren, dass mit wenig Aufwand ein Notfallgedächtnis gebildet werden kann, das wenige Tage nutzbar ist, um dann zu verfallen. Der parallel dazu gebildete zweite Gedächtniskanal ist vom Stoffwechselfaufwand her deutlich „kostspieliger“ und wird deshalb auf Lebenszeit angelegt. Um diesen dauerhaften Kanal zu eröffnen, werden Schlüsselbotenstoffe aus der Klasse der Neuropeptide benötigt, einer diversen und sehr potenten Gruppe neuronaler Botenstoffe, die überall im Tierreich verbreitet ist. Neuropeptide beeinflussen auch das menschliche Verhalten und Empfinden. Ein berühmter Vertreter ist „Oxytocin“. Es steuert beim Menschen die Geburts- und Stillprozesse sowie unsere sozialen Interaktionen. Auch die „Endorphine“ zählen zur einflussreichen Gruppe der Neuropeptide: Als körpereigene Opioide können sie beispielsweise unser Schmerzempfinden verändern. Von den beiden Neuronen werden Neuropeptide nur dann in das Lernzentrum des Fliegenhirns freigesetzt, wenn ein dauerhaftes Trauma-Gedächtnis aufgebaut werden soll.

Noch haben wir die Identitäten der Neuropeptide nicht vollständig aufgeklärt, die von den beiden Neuronen ausgeschüttet werden – wenn wir diese Zellen aber experimentell daran hindern, Neuropeptide zu produzieren und freizusetzen, kann kein dauerhaftes Trauma-Gedächtnis entstehen. In diesem Fall ist lediglich das vergängliche Notfallgedächtnis verfügbar.

Es zeigt sich also: Fliegen benötigen nur zwei Schlüsselneurone, um ihr Lernzentrum zu instruieren, negative Erfahrungen entweder in einem vergänglichen Notfallspeicher abzulegen oder ein lebenslang anhaltendes Gedächtnis aufzubauen. Die Entscheidung für den Aufbau des lang anhaltenden Gedächtnisses treffen die Neuropeptide. Kürzlich konnte gezeigt werden, dass die beiden Schlüsselneurone nicht nur das Gedächtnis, sondern auch das Schlafverhalten von Fliegen kontrollieren. Die möglichen Interaktionen zwischen Schlafen und Gedächtnisbildung sind offensichtlich, die Details müssen allerdings noch näher untersucht werden.

In diesem Jahr hat ein Wissenschaftlerkonsortium vom Janelia Research Campus des Howard Hughes Medical Institute (Maryland, USA) das erste vollständige „Konnektom“ des Gehirns der Tauflye *Drosophila melanogaster* fertiggestellt. Konnektom heißt: Alle Synapsen jedweder Nervenzelle des Fliegenhirns wurden kartiert und alle neuronalen Kommunikationspartner dreidimensional rekonstruiert. Die detaillierte Landkarte des Gehirns ermöglicht neue Einblicke und erlaubt es darüber hinaus, individuelle Neurone besser für gezielte experimentelle Manipulationen zugänglich zu machen.

LEARNING AND FORGETTING

# OF FLIES AND MAN

CHRISTOPH SCHUSTER

Learning and remembering in order to better master future challenges – that is why we have a brain. The ability to remember what we have learned has saved us from misfortunes, optimised our survival strategies, allowed us to discover relationships and nourished the growth of knowledge. However, our memories are not perfect. Some events we forget, some we remember incorrectly and some we would prefer to forget, but cannot. Learning, memory formation, memory retrieval and forgetting are essential properties of our brain that, when out of balance, can disable us. That is why we need to better understand the principles underlying these processes, so that we can develop targeted therapies if things go wrong.

The brain of the fruit fly *Drosophila melanogaster* only has about 100,000 neurons, ten million times fewer neurons than a human brain. In spite of the relative simplicity of fly brains, we have discovered that flies and humans share astonishing parallels in trauma-related memory behaviour. These include the fact that trauma memories are stored for life, they can be updated and are not subject to simple forgetting. Extinction therapy can temporarily suppress their recall, and relapses force extinguished memories back to the surface. We also found that flies have evolved remarkable mechanisms to control their memory channels: a single pair of neurons instructs the flies' learning centre to either form a simple and transient emergency memory or a complex but permanent trauma memory. The keys that open the gates to either of these memory channels are distinct neurotransmitters. Importantly, when we suppressed the release of the key neurotransmitter of trauma memory in just these two neurons, the flies were protected from generating a permanent memory. These findings gained from studying flies may pave the way for the development of novel intervention strategies for trauma-related disorders in humans. ●

**“Findings gained in the study of simple organisms may pave the way for successful treatment of trauma-related disorders in humans.”**

**PROF. DR CHRISTOPH**

**SCHUSTER** joined Heidelberg University as Professor of Neurobiology in 2004. He studied biology in Erlangen-Nuremberg and Heidelberg and completed his PhD thesis at the Center for Molecular Biology of Heidelberg University and at the Max Planck Institute for Brain Research in Frankfurt/Main. Following a research stay at the University of California in Berkeley, he accepted a position as head of an independent research group at the Friedrich Miescher Laboratory of the Max Planck Society in Tübingen. Christoph Schuster serves on the boards of Heidelberg University's Interdisciplinary Center for Neurosciences and of the Bernstein Center for Computational Neuroscience, an initiative of the German Ministry of Education and Research. His research interests are the mechanisms of memory formation and the fundamental principles of mental disease. He is a recipient of the Heinz Maier-Leibnitz Prize of the German Research Foundation; his work is being funded within the 'Neurosciences' excellence programme of the Hertie Foundation.

Contact: schuster@  
nbio.uni-heidelberg.de

Dank der Karte wird es bereits in naher Zukunft erstmals möglich sein, funktionelle Abbilder aller Gedächtnisphasen und aller daran beteiligten neuronalen und synaptischen Ensembles zu beschreiben. Die Ensembles und deren Veränderungen werden auf wichtige organisatorische Prinzipien hinweisen, auf denen Lernprozesse und der Aufbau des Gedächtnisses beruhen. Sie werden auch erklären können, wie die verschiedenen Formen des Vergessens entstehen, die wir im Fliegenhirn beobachtet haben.

Abgesehen von den grundsätzlichen Einblicken in die prinzipielle Organisation von verschiedenen Gedächtniskanälen bieten sich die beiden beschriebenen Schlüsselneurone der Fliegen als potenzielle Ziele an, um zu verhindern, dass ein dauerhaftes Trauma-Gedächtnis entsteht. Lassen diese neuen, am Fliegenhirn gewonnenen Erkenntnisse aber auch verstehen, wie unterschiedliche Gedächtnisformen im menschlichen Gehirn organisiert werden? Eröffnen die neuen Erkenntnisse womöglich gar einen Weg, um psychische Erkrankungen des Menschen, etwa posttraumatische Belastungsstörungen, mit neuen Ansätzen erfolgreich zu behandeln?

#### **Uralte Funktionsprinzipien**

Die übereinstimmenden trauma-assoziierten Gedächtnisphänomene bei Fliege und Mensch legen nahe, dass es sich dabei um uralte Fähigkeiten von Gehirnen handelt, die bereits unsere gemeinsamen Vorfahren vor 600 Millionen Jahren besaßen. Im Laufe der Evolution wurden diese wichtigen Fähigkeiten auf prinzipieller Ebene konserviert; sie haben sich aber dennoch unabhängig voneinander weiterentwickelt und den jeweiligen Lebens- und Entwicklungsumständen entsprechend optimiert. Gleiche Funktionsprinzipien sind deshalb nicht gleichzusetzen mit identischen Mechanismen: Es ist wahrscheinlicher, dass das menschliche Gehirn ein Vielfaches an Neuronen und komplexere molekulare Interaktionen nutzt, um dieselben Funktionsprinzipien zu verwirklichen wie Fliegen. Nichtsdestotrotz bereiten die bei Fliegen gewonnenen Erkenntnisse zu den Funktionsprinzipien der Gedächtnisbildung den Weg für Erfolg versprechende neue Strategien in der Behandlung von trauma-assoziierten Erkrankungen des Menschen. ●

**„An einfachen Organismen gewonnene Erkenntnisse bereiten den Weg, um Traumakerkrankungen des Menschen erfolgreich zu behandeln.“**

**KEIN HALTEN**

**MEHR**



KEIN HALTEN MEHR

# WENN STRESS KRANK MACHT

BEATE DITZEN &amp; MARTIN STOFFEL

**Höher, schneller, mehr – auf ein ständiges „Go“ folgt manchmal totaler „Stop“. Langfristig kann Stress zu Ermüddungserscheinungen führen, wir fühlen uns überfordert, erbringen schlechtere Leistungen im Beruf, reagieren gereizt und werden schließlich krank. Heidelberger Psychologen untersuchen, welche Bedingungen es genau sind, unter denen uns Stress krank werden lässt, und welche Faktoren uns hiervor schützen können. Ein besonderer Effekt kommt dabei unseren sozialen Beziehungen zu.**

# S

Stress wird häufig als modernes Phänomen, als ein Zeichen unserer Zeit gesehen. Tatsächlich aber stammt der Begriff aus der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts – geprägt wurde er erstmals im Jahr 1936 von dem Mediziner Hans Selye, einem österreichischen Immigranten in den USA. Eigentlich hätte Selye zur Beschreibung des von ihm untersuchten biochemischen Phänomens das Wort „Strain“ wählen müssen – das bezeichnet die Anstrengung, die wir aufwenden müssen, um mit einer Belastung, dem Stressor, fertigzuwerden. Als der Mediziner sich des Irrtums bewusst wurde, war es jedoch schon zu spät: Das Wort Stress hatte sich durchgesetzt und machte in der Folgezeit eine

# „Laut einer WHO-Studie werden stressbedingte Beeinträchtigungen bis zum Jahre 2020 die zweithäufigste Ursache für Krankheiten darstellen.“

steile Karriere. In den 1970er-Jahren drang der Begriff im Zuge der Popularisierung der Psychologie in die Umgangssprache. Inzwischen kommt uns kaum ein Wort mehr leichter über die Lippen, um unsere Befindlichkeit mitzuteilen. In der Arbeit, in der Freizeit, in der Beziehung – überall sind wir „im Stress“.

Doch wie ist Stress eigentlich zu bewerten? Ist Stress ein gesellschaftliches Problem? Macht Stress krank, können wir durch ihn wirklich „ausbrennen“? Können wir Stress auslösenden Umwelt- und Arbeitsbedingungen oder gesundheitlichen Stressfolgen vorbeugen und sind Stressprävention und Stressbewältigung auf einer biologisch-körperlichen Ebene nachzuweisen? Unsere Forschungsgruppe „Psychobiologie von Stress“ am Institut für Medizinische Psychologie – eine Einrichtung des Zentrums für Psychosoziale Medizin am Universitätsklinikum Heidelberg – befasst sich mit genau diesen Fragen. Dazu untersuchen wir grundlegende Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung von Stress und körperlichen Prozessen, die psychische oder physische Erkrankungen auslösen oder begünstigen können. Wir führen außerdem Interventionen durch und werten diese hinsichtlich ihrer Stress reduzierenden Wirksamkeit aus. Dies geschieht mit einem starken Fokus auf biologischen Veränderungen, die Aufschluss über gesundheitsförderliche Effekte der durchgeführten Programme geben.

## Werden wir alle immer gestresster?

Folgen von chronischem Stress rücken seit Anfang der 1990er-Jahre immer mehr in den Fokus der öffentlichen



**MARTIN STOFFEL** studierte Psychologie in Darmstadt. Im Jahr 2015 begann er mit seiner Doktorarbeit am Institut für Medizinische Psychologie unter Leitung von Prof. Beate Ditzen. Sein Hauptaufgabebereich liegt in der Leitung eines biochemischen Labors, in dem Hormone, Enzyme und Immunstoffe im Kontext medizinisch-psychologischer Fragestellungen analysiert werden. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Themengebiete Stressbewältigung und psychobiologische Prozesse der Stressreaktion.

Kontakt: [martin.stoffel@med.uni-heidelberg.de](mailto:martin.stoffel@med.uni-heidelberg.de)

Aufmerksamkeit. Dieser Prozess begann durch eine Initiative der Weltgesundheitsorganisation (WHO), die im Jahre 1990 eine Untersuchung zur Häufigkeit aller bekannten Erkrankungen mit dem Titel „The Global Burden of Disease“ in Auftrag gab. Zweck der Studie war es, die Erkrankungen nach ihrem schädlichen Einfluss auf die Gesellschaft zu klassifizieren und die resultierenden Beeinträchtigungen für die kommenden Jahrzehnte zu skizzieren. Ihr Ergebnis: Bis zum Jahre 2020 werden stressbedingte psychische und körperliche Beeinträchtigungen die zweithäufigste Ursache für krankheitsbedingtes Leiden darstellen.

Die WHO-Studie sorgte dafür, dass ein allgemeines Problembewusstsein für die gesundheitsschädigenden Folgen von Stress entstand. So wurde 1993 ein Bericht der „UN International Labour Organization“ mit dem Namen „Job Stress: The 20th Century Disease“ veröffentlicht. Dieser Bericht stellte zum ersten Mal öffentlichkeitswirksam heraus, dass sich die veränderten Belastungsanforderungen der modernen Arbeitswelt – eine Folge der Industrialisierung – negativ auf die Gesundheit von Angestellten und letztlich auch negativ auf wirtschaftliche Faktoren auswirken können. Tatsächlich hat die Bereitschaft, von chronischem Stress zu sprechen, in den letzten Jahren erheblich zugenommen – ob auch die faktische Belastung stärker geworden ist, lässt sich hiervon nicht klar abgrenzen. So klagen nach einem Bericht der Techniker Krankenkasse (2009) mehr als achtzig Prozent der Deutschen über Stress. Alle gesellschaftlichen Schichten, unabhängig von Bildungsstand oder Geschlecht, sind betroffen.

### Was passiert bei Stress?

Evolutionär betrachtet haben sich menschliche Stresssysteme durch natürliche Selektion gebildet. Sie helfen uns dabei, angesichts sich stetig verändernder Umweltbedingungen und in potenziell gefährlichen Situationen adäquat reagieren zu können. Eine wichtige Rolle hierbei spielt das autonome Nervensystem, das in die Unterheiten Sympathikus und Parasympathikus unterteilt wird. Der Sympathikus initiiert über die Ausschüttung von sogenannten Katecholaminen (zum Beispiel Adrenalin und Noradrenalin) aus dem Nebennierenmark die akute Stressreaktion, wodurch es zur Weitung der Bronchien, einer Zunahme der Herzfrequenz, zum Zusammenziehen der Venen, zur Verarbeitung von Zucker in den Skelettmuskeln und in der Leber sowie zur Verarbeitung von Fetten im Gewebe kommt. Es stehen damit mehr Sauerstoff und Energie für die Reaktion auf Stressoren bereit. Der US-amerikanische Physiologe Walter Cannon prägte Anfang des 20. Jahrhunderts im Zusammenhang mit dieser schnellen Aktivierung des Sympathikus in bedrohlichen Situationen den Begriff „Fight or flight“-Reaktion: Bei akuter Bedrohung muss demnach zwischen Kampf oder Flucht gewählt werden, um den Körper zu schützen. Gegenspieler des Sympathikus ist der Parasympathikus: Er sorgt für ein Absenken von Blutdruck und Herzfrequenz, wird also dann aktiv, wenn wir uns entspannen.

Einen weiteren zentralen Teil der Stressantwort bildet die Produktion von Glucocorticoiden – und hier ihrem bedeutendsten Vertreter Cortisol. Cortisol wird circa 15 Minuten nach der Wahrnehmung eines Stressors ausgeschüttet und verteilt sich im Körper über den Blutkreislauf. Es sorgt für eine vermehrte Neubildung von Zucker, hemmt die Wirkung von Insulin und verstärkt die Effekte von Adrenalin und Noradrenalin. Zudem beeinflusst Cortisol die Verdauung, unterdrückt die Aktivität der Geschlechtshormone und entfaltet an vielen Stellen des Körpers immunsuppressive Wirkungen. In Kombination verdeutlichen die schnelle Katecholamin-Ausschüttung und die zeitlich verzögerte Produktion von Cortisol die kurz- und langfristige Anpassung der Körpersysteme an belastende Umweltbedingungen: Unmittelbar wird Zucker zur Verfügung gestellt, Fett wird umgesetzt und das Immunsystem wird heruntergefahren, sodass es zu keiner Immunantwort (zum Beispiel Fieber) kommen kann – denn wenn das körperliche Wohl bedroht ist, muss der Organismus schnell reagieren und kann es sich kaum leisten, krank zu werden. Letzteres passiert üblicherweise dann, wenn der Stress nach Phasen der großen Anstrengung wegfällt und wir eigentlich wieder entspannen könnten – am Wochenende oder in den Ferien.

### Wann ist zu viel zu viel?

Langfristig führt die Überaktivierung der körperlichen Alarmsysteme zu Abnutzungs- und Ermüdungserscheinungen, wir fühlen uns zunehmend überfordert, erbringen



**PROF. DR. BEATE DITZEN** studierte Psychologie in Darmstadt, Dijon, Frankreich, und Berlin. Nach Forschungsaufenthalten und psychotherapeutischer Arbeit in Zürich, Schweiz, und Atlanta, USA, erhielt sie im Jahr 2014 den Ruf auf die Professur für Medizinische Psychologie und Psychotherapie an der Universität Heidelberg. Seit Herbst 2014 leitet sie hier am Universitätsklinikum das Institut für Medizinische Psychologie. Der Forschungsfokus des Instituts liegt auf dem Einfluss sozialer Beziehungen auf die Gesundheit.

Kontakt: [beate.ditzen@med.uni-heidelberg.de](mailto:beate.ditzen@med.uni-heidelberg.de)

schlechtere Leistungen im Beruf, reagieren gereizt auf Probleme im sozialen Umfeld und werden schließlich krank – kurz: Wir brennen aus. In den letzten Jahren wurde für diese Symptomatik der dauerhaften Überlastung der Begriff „Burnout“ geprägt, wenngleich dies keine offizielle Diagnose ist und eine genaue Definition bis heute fehlt. Auch die Abgrenzung zu anderen psychischen Störungen wie beispielsweise einer Depression gestaltet sich als schwierig.

Was Depressionen, chronischer Stress und „Burnout“ gemeinsam haben, ist eine dauerhafte Veränderung der körperlichen Stresssysteme. Ist Stress also immer schlecht? Je mehr Stress, desto schlimmer für den Körper? Die Annahme eines linearen Zusammenhangs lässt sich so nicht aufrechterhalten: Wir benötigen ein bestimmtes Maß an Anspannung und Aktivierung, um handeln zu können. Schon Anfang des letzten Jahrhunderts wurde im „Yerkes-Dodson Law“ der Zusammenhang zwischen Aktivierung und Leistungsfähigkeit als umgekehrtes U dargestellt – diese Kurve gilt auch für den Zusammenhang von Stress und Gesundheit. Schon unsere Vorfahren wären im Zustand absoluter Entspannung nicht fähig gewesen, vor einem angreifenden Tier wegzulaufen. Genauso wenig könnten wir frei von Aktivierung einen gelungenen Vortrag halten.

Mittlerer Stress also hält den Körper flexibel und agil, traumatische Belastung oder chronischer Stress erschöpfen die körperlichen Systeme. Entscheidend ist hier die Deutung der Situation und damit verbunden unsere gefühlte Kontrolle. Wenn wir das Ende der Belastung abschätzen können, ein Stressor folglich nicht chronisch wirkt, haben auch eine intensive Belastung und die damit verbundene psychobiologische Reaktion kaum negative Konsequenzen. Das Zusammenspiel von Stress und der körperlichen und psychischen Gesundheit stellt somit keine On-Off-Beziehung dar. Vielmehr handelt es sich um eine komplexe Interaktion, die von der Intensität, Dauer und Interpretation der Stressoren geprägt wird sowie den körperlichen Gegebenheiten, auf die diese Kombination trifft.

### Soziale Faktoren der Stressantwort

Weitere entscheidende Faktoren, die den Zusammenhang zwischen Stress und gesundheitlichen Folgen beeinflussen, sind soziale Einflüsse. Soziale Bewertung, Konflikte und – im Extremfall – soziale Bedrohungen oder emotionaler Missbrauch lassen die Stressreaktion verlässlich ansteigen und führen je nach Dauer zu deutlichen Beeinträchtigungen in der Stressverarbeitung. Soziale Einbindung und soziale Unterstützung hingegen wirken als Stresspuffer. Die soziale Unterstützung, also der willentliche Akt, einer anderen Person zu helfen, kann die psychobiologische Stressantwort dabei über zwei Mechanismen beeinflussen. Ihr Haupteffekt ist eine

# „Entscheidend für die Folgen von Stress ist die Deutung der Situation und damit verbunden unsere gefühlte Kontrolle.“

grundsätzlich positive Wirkung, also unabhängig von einem Stressor. Darüber hinaus hat die soziale Unterstützung aber auch einen Puffereffekt, indem sie die Stressantwort in Zeiten der Belastung abschwächt.

Beide Effekte können sich ergänzen und nebeneinander bestehen, und beide lassen sich gut im Laborexperiment und im Alltag von Individuen nachweisen. In Laborstresstests lassen wir unsere Probandinnen und Probanden zu diesem Zweck ihre Unterstützungsquelle mitbringen, zum Beispiel den Partner oder einen Freund. Im Alltag geben die Studienteilnehmer zu fest definierten Tageszeiten Speichelproben ab, die sie bis zur Laboranalyse im Kühlschrank aufbewahren. Aus diesen Speichelproben analysieren wir dann unter anderem Cortisol als Indikator der körperlichen Stressbelastung. Gleichzeitig berichten die Studienteilnehmer über ihr Smartphone, mit wem sie Kontakt hatten und wie sie diesen Kontakt empfunden haben. Tatsächlich zeigt sich in diesen Studien ein Zusammenhang zwischen der subjektiv erlebten Belastung und den Cortisolwerten im Speichel: Je höher der empfundene Stress am Tag ist, desto mehr Cortisol wird ausgeschüttet. Positive soziale Interaktionen, unter anderem die Anwesenheit von Freunden oder die wahrgenommene Vertrautheit mit dem Partner, sind hierbei nachweislich mit geringeren Cortisolwerten assoziiert. Dabei berücksichtigen wir, dass Cortisol neben diesen psychologischen Einflüssen durch viele weitere Faktoren maßgeblich verändert wird, unter anderem durch Essen, Schlafdauer, Sport, Koffein oder etwa durch Rauchen. Auch diese Faktoren erfassen wir in unseren Studien und beziehen sie statistisch ein.

## Stressprävention und Stressbewältigung

Solche Untersuchungsdesigns verwenden wir am Institut für Medizinische Psychologie mit Studierenden und Promovenden, mit älteren Studienteilnehmern im Arbeitskontext, mit Patienten, die an einer Schmerzerkrankung leiden, oder auch mit depressiv Erkrankten. Die Studien bilden die Basis und das Evaluationskriterium für die Stresspräventions- und Stressbewältigungstrainings, die wir am Institut anbieten. Denn wir fragen uns natürlich, wie sich die Wahrnehmung der eigenen Situation verändern lässt, wenn doch die Umweltbedingungen – Überforderung oder ambivalente Aufgaben, Zeitdruck, private Probleme – nicht änderbar scheinen.

Der Fokus unserer Interventionen liegt hierbei insbesondere auf sozialen Interaktionen, achtsamkeitsbasierten Verfahren und dem Erkennen eigener Ressourcen. Alle diese Faktoren können dabei helfen, die Wahrnehmung der als stressig empfundenen Situation zu verändern und die schädlichen Folgen von Stress auszuhebeln. Gemeinsam mit den Universitäten Basel und Zürich haben wir ein Stressbewältigungstraining mit dem Namen „Der Grüne Bereich“ entworfen, das an diesen Punkten ansetzt.

STEMMING THE TIDE

# STRESS-RELATED ILLNESS

BEATE DITZEN &amp; MARTIN STOFFEL

Stress is one of the most important phenomena of our society and affects our subjective well-being and physical health. But how should stress be rated? Under what circumstances does stress make us sick, which kind of stressors, which intensity, and which duration can modulate the body systems in a way that might trigger stress-related disease? Is it possible to avoid stress-inducing environmental and work conditions or keep stress from affecting our health, and can we trace the effects of stress prevention and stress management techniques on the biological-physical level? Despite the broad influences of stress, the answers to these questions remain surprisingly unclear.

The Heidelberg research group ‘Psychobiology of stress’ at the Institute for Medical Psychology – which belongs to the Center for Psychosocial Medicine of Heidelberg University Hospital – investigates these very questions. To this end, we examine basic connections between stress perception and physical processes that can encourage or trigger mental or physical disease. We perform interventions and evaluate them in terms of their effectiveness in reducing stress. In doing so, we pay particular attention to biological changes that give an indication of the health benefits provided by the implemented programmes. Initial findings suggest that our interventions can change the patterns of stress-related biomarkers such as the hormone cortisol. This means we can actually respond to our stress levels in an adaptive way and thereby improve individual health. ●

PROF. DR BEATE DITZEN studied psychology in Darmstadt, Dijon (France) and Berlin. After completing research stays and working as a psychotherapist in Zurich (Switzerland) and Atlanta (USA), she accepted the Chair of Medical Psychology and Psychotherapy at Heidelberg University in 2014. In the autumn of the same year, she became head of the Institute for Medical Psychology at Heidelberg University Hospital. The institute investigates the influence of social relationships on our health.

Contact: beate.ditzen@  
med.uni-heidelberg.de

MARTIN STOFFEL studied psychology in Darmstadt. In 2015 he began doing research for his doctoral thesis at the Institute for Medical Psychology headed by Prof. Beate Ditzen. He is in charge of a biochemical laboratory in which researchers analyse hormones, enzymes and antibodies within the context of medical-psychological questions. Martin Stoffel's research interests include stress management and the psychobiological processes of stress reactions.

Contact: martin.stoffel@  
med.uni-heidelberg.de

**“The more stress, the worse the effect on the body? This simple equation does not hold true. Rather, the effects of stress depend on our interpretation of the situation and, by extension, our feeling of control.”**

Basierend auf den ursprünglich psychotherapeutischen Verfahren der lösungsorientierten Kurzzeittherapie von Steve de Shazer bitten wir die Teilnehmer, auf einen positiven Zielzustand zu fokussieren. Anschließend erarbeiten wir in der Gruppe, was genau für jeden individuell diesen Zustand ausmacht. Die Idee, die hinter diesem Ansatz steckt, ist, weniger auf das „weg vom Stress“ zu fokussieren, um sich stattdessen auf das „hin zu einem gewünschten Gefühl“ zu konzentrieren.

In einem achtsamkeitsbasierten Stressbewältigungstraining, das wir am Institut für Medizinische Psychologie mit Studierenden durchgeführt haben, wurden darüber hinaus Achtsamkeits-, Progressive-Muskel-Relaxations- und Body-Scan-Elemente vermittelt. Der Grundgedanke bei der Durchführung solcher Übungen ist, einen aktiven und wachen Zustand der Aufmerksamkeit zu schulen und gleichzeitig das nicht-wertende Beobachten eigener Gedanken und Emotionen zu trainieren. Dies hilft dabei, vergangenen Stress besser zu verarbeiten und zukünftigen Belastungen gelassener zu begegnen. Aus Speichelproben (wie oben beschrieben) sowie aus Blutproben analysierten wir anschließend Hormon- und Immunparameter der Teilnehmer. Tatsächlich deuten unsere aktuellen Analysen darauf hin, dass der Cortisolspiegel nach dem Stressbewältigungstraining niedriger ist als der einer Kontrollgruppe, die nicht am Training teilgenommen hat.

Auch mit Stress assoziierte epigenetische Prozesse – also eine veränderte Genaktivierung infolge von Stressverarbeitung – können wir aus Blut- und Speichelproben bestimmen. Hier liegt unser Interesse auf Veränderungen im Serotoninsystem des Körpers und darauf, wie dieses System durch langfristige Phasen von Stress – aber auch durch Interventionen zur Stressreduktion – beeinflusst werden kann. Zentral-nervöser Serotoninmangel wird mit psychischen Erkrankungen, wie der Depression, in Verbindung gebracht. Die Resultate hätten also potenzielle Bedeutung über die unmittelbare Stressreaktion hinaus. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen weisen darauf hin, dass unsere Interventionen auch auf epigenetischer Ebene zu Veränderungen führen, die mit höherer Serotoninaktivität und damit auch einer besseren psychischen Gesundheit zusammenhängen. Selbst wenn die Zahl der äußeren Stressoren also zunehmen mag, die Forschung zeigt: Wir sind unserem Stress und seinen negativen Einflüssen auf die Gesundheit keineswegs hilflos ausgeliefert. ●

**„Soziale Interaktionen, achtsamkeitsbasierte Verfahren und das Erkennen eigener Ressourcen können die schädlichen Folgen von Stress aushebeln.“**

**NEURVEN  
ÜBERREIZTE**



ÜBERREIZTE NERVEN

# EIN MOLEKÜL BREMST DEN SCHMERZ AUS

JAN SIEMENS

Von chronischen Schmerzen werden allein in Deutschland acht bis zehn Millionen Menschen gequält. Der anhaltende Schmerz ist nur schwer zu behandeln, nach neuen Therapieansätzen wird dringend gesucht. Wissenschaftler des Pharmakologischen Instituts der Universität Heidelberg konnten nun einen neuen molekularen Signalweg aufzeigen, der es ermöglichen könnte, den Schmerz wirksam zu dämpfen, ohne wichtige Regulationsprozesse im Körper zu stören.

# O

Ohne zu überlegen ziehen wir unsere Hand von der heißen Herdplatte, um eine Verbrennung zu vermeiden. Das ist ein Beispiel für die gesund erhaltende Funktion von Schmerz: Das Schmerzsignal löst schützende Abwehrreaktionen und Reflexe aus, die eine Schädigung des Gewebes verhindern. Entzündungen, Verletzungen oder Tumoren aber können zu einer krankhaften Reaktion führen: Schmerzfasern in Haut und Bindegewebe reagieren überempfindlich auf Schmerz auslösende und andere Reize, sodass es zu einer Chronifizierung von Schmerz kommen kann. Ein neuer Therapieansatz, um anhaltenden Schmerzen zu begegnen, ist daher, der Sensibilisierung von Schmerzfasern vorzubeugen oder eine Sensibilisierung, die bereits stattgefunden hat, wieder rückgängig zu machen.

Wie sich eine solche Sensibilisierung anfühlt, weiß jeder, der sich schon einmal einen Sonnenbrand zugezogen hat: Selbst die leichte Berührung von Kleidung auf der Haut schmerzt, und sonst wohltuende Wärme wird als unangenehm empfunden. Bei Verletzungen oder Entzündungen verhält es sich ähnlich. Die Reaktion des Nervensystems auf länger anhaltende Schmerzreize kann durchaus sinnvoll sein: Die betroffenen Bereiche werden geschont, was die Heilung fördert. Wenn die gesteigerte Sensibilität allerdings nicht wieder abgeschaltet wird – etwa weil ein Entzündungsherd langfristig bestehen bleibt oder Nervenfasern durch eine Verletzung dauerhaft geschädigt wurden –, kann dies zu chronischen Schmerzen führen.

## Übersensible Schmerzfasern

In unserer Heidelberger Arbeitsgruppe untersuchen wir, wie die Sensibilisierung von Schmerzfasern erfolgt, und konzentrieren uns dabei auf einen Ionenkanal-Rezeptor, der sich in Schmerzfasern findet, die unsere Haut, unsere Knochen und inneren Organe durchziehen. Bei diesem „Capsaicin-Rezeptor“, kurz TRPV1, handelt es sich um einen molekularen Schmerz- und Entzündungssensor, der von verschiedenen Reizen, etwa von Hitze, saurem Milieu oder entzündungsfördernden Botenstoffen aktiviert wird und für Schmerzsignale sensibler macht. Wenn wir beispielsweise einen Sonnenbrand erleiden, wird der Capsaicin-Rezeptor von entzündungsfördernden Botenstoffen, die aufgrund der starken Sonneneinstrahlung freigesetzt wurden, sensibilisiert. Dies trägt maßgeblich

zum schmerzhaften „Sonnenbrandeffekt“ bei. Zahlreiche grundlegende Arbeiten haben inzwischen zeigen können, dass der Capsaicin-Rezeptor verschiedenste Schmerz- und Entzündungssignale integriert. Hält der Schmerzreiz länger an, etwa bei Entzündungsprozessen, wird der Capsaicin-Rezeptor modifiziert, häufiger gebildet und verstärkt in die Membran von Nervenzellen eingebaut. Die Folge: Die Nervenenden sind leichter erregbar und melden dem Gehirn bereits schwache Reize als Schmerz.

Wegen der zentralen Rolle, die dem Rezeptor beim Weiterleiten von Reizen und dem Entstehen von Schmerzen zukommt, gilt der Capsaicin-Rezeptor als vielversprechender Angriffspunkt für neue schmerzlindernde Substanzen. Studien belegen, dass Hemmstoffe, die sich gegen den Rezeptor richten, tatsächlich einen schmerzlindernden Effekt zeigen. Für die Therapie lassen sich diese Substanzen jedoch bislang nicht nutzen. Der Grund: Die bis dato erprobten Wirkstoffe schalten den Capsaicin-Rezeptor vollständig aus – ohne den Rezeptor sind die Nervenzellen aber offenbar nicht mehr in der Lage, die Temperatur des Körpers zu erfassen. Infolgedessen versagt die Wärmeregulation, es kommt zu Hyperthermie, einem fieberähnlichen Zustand, bei dem die Körpertemperatur stark erhöht ist. Darüber hinaus macht die komplette Blockade des Rezeptors unempfindlich gegenüber Hitzeschmerzreizen. Nicht der komplette „Stop“ des Rezeptors kann also das Ziel sein. Stattdessen erscheint es sinnvoll, die Sensibilisierung des Rezeptors zu verhindern. Ein gleichsam gedrosseltes „Go“ ist womöglich die geeignetere Methode für einen wirksamen neuen Therapieansatz.

## Kooperierende Partnermoleküle

Mit unserem Heidelberger Ansatz, der molekularbiologische, biochemische und genetische Methoden einschließt, haben wir nun erstmals einen Mechanismus aufzeigen können, mit dem es gelingen könnte, eine erhöhte Sensibilität des Rezeptors wieder herunterzufahren. Unsere Arbeit basiert auf der Entwicklung eines genetischen Hilfsmittels, das es uns erlaubt, Moleküle zu identifizieren, die den Rezeptor beeinflussen und modulieren. Dazu haben wir den Capsaicin-Rezeptor markiert, indem wir eine kurze DNS-Sequenz in das Erbgut von Mäusen eingebracht haben. Das markierte Rezeptor-Protein wird daraufhin in den Schmerzfasern der Maus gebildet und übernimmt dort die Funktion des unmarkierten „normalen“ Rezeptors. Die Markierung erlaubt es uns, den Rezeptor mitsamt der an ihn gebundenen Partnermoleküle aus dem Nervengewebe herauszulösen. Diese Isolierung im molekularen Maßstab ist vergleichbar mit einem Magneten, der aus einer Mischung magnetischer (= markierter) und nicht-magnetischer (= unmarkierter) Partikel ausschließlich die magnetischen Partikel herausfischt und sauber von den nicht-magnetischen Partikeln trennt. Die zusammen mit ihren Partnerproteinen isolierten Rezeptoren werden

sodann einer speziellen Methode, der „Massenspektrometrie“, unterzogen. Sie erlaubt es, die Partnerproteine anhand ihrer Masse und ihres Zerfallsmusters genau zu identifizieren, denn jedes Protein erzeugt im Massenspektrometer ein charakteristisches Muster, vergleichbar mit dem Muster eines Fingerabdrucks. Mittels eines Datenbankabgleiches – ähnlich dem Verfahren in der Kriminalistik, um einen Täter zu überführen – können die Partnerproteine des Rezeptors anhand ihres speziellen Musters identifiziert werden.

Unsere massenspektrometrische Analyse endete mit einer Überraschung: Wir konnten noch einen weiteren Rezeptor – den GABA<sub>B1</sub>-Rezeptor – als Partner des Capsaicin-Rezeptors identifizieren. Das ist interessant, weil GABA<sub>B1</sub> schon zuvor im Zusammenhang mit der Linderung von Schmerzen beschrieben worden ist. Die bisherigen Studien hatten GABA<sub>B1</sub> allerdings als Mediator in zentralnervösen

#### **Forschung an komplexen biologischen Netzwerken**

Der Exzellenzcluster „Cellular Networks“, kurz CellNetworks, hat zum Ziel, das Verhalten und die dynamische Veränderung komplexer biologischer Netzwerke zu beschreiben und ihre Regulationsmechanismen zu verstehen. Dafür vereint CellNetworks exzellente Forschungsgruppen aus verschiedenen Instituten der Heidelberger Lebenswissenschaften und bündelt die vielfältigen Kapazitäten und Kompetenzen, die der Wissenschaftsstandort Heidelberg in der lebenswissenschaftlichen Forschung zu bieten hat. Zu den außeruniversitären Partnern des Clusters zählen neben dem Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) das Europäische Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) und das Max-Planck-Institut für medizinische Forschung (MPIMF). Eine starke Stütze stellt zudem die DKFZ-ZMBH-Allianz dar, die die Grundlagenforschung am Zentrum für Molekulare Biologie (ZMBH) der Universität mit der Zell- und Tumorbologie des DKFZ zusammenbringt.

Die Mitarbeiter von CellNetworks erarbeiten gemeinsam Grundlagenwissen, forschen für medizinische Anwendungen und untersuchen technische Weiterentwicklungen. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit und die vielen internationalen Kooperationen am Cluster finden die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler optimale Forschungsbedingungen vor. Neben seinem breiten Forschungsnetzwerk mit Schwerpunkten in Europa, den USA, Japan, Indien und Australien bietet CellNetworks modernste Infrastruktur im Bereich der Zellbiologie und investiert in die Gewinnung hervorragender Nachwuchswissenschaftler.

[www.cellnetworks.uni-hd.de](http://www.cellnetworks.uni-hd.de)

**„Acht bis zehn Millionen Menschen werden allein in Deutschland von chronischen Schmerzen gequält. Nach effektiven Therapieansätzen wird dringend gesucht.“**

# „Wir haben einen Weg gefunden, um einen überaktiven Schmerz-Rezeptor so zu bremsen, dass er weiterhin gedrosselt Signale liefern kann: statt eines kompletten ‚Stop‘ ein geregeltes ‚Go‘.“

Strukturen des Gehirns gezeigt – und nicht in peripheren Nervenenden, die auch den Capsaicin-Rezeptor enthalten. Auf der Basis der vorliegenden Daten formulierten wir die Hypothese, dass der Rezeptor  $GABA_{B1}$  die Aktivität des Capsaicin-Rezeptors hemmt, was einen bislang unbekanntem schmerzlindernden Mechanismus darstellen könnte. Inzwischen konnten wir unsere Hypothese durch verschiedene zelluläre Experimente und in Verhaltenstests mit Mäusen untermauern und bestätigen.

## **Totalblockade unerwünscht**

Der Signalgeber für den  $GABA_{B1}$ -Rezeptor ist ein klassischer Botenstoff des zentralen Nervensystems: die Gamma-Amino-Buttersäure, kurz GABA. Deren Funktion wurde bisher nicht im Bereich der peripheren Nervenenden von Schmerzfasern vermutet. Genau dort aber haben wir den Botenstoff entdeckt: Wir fanden heraus, dass GABA durch Schmerzreize aus den Enden von Schmerzfasern

freigesetzt werden kann. Darüber hinaus konnten wir Folgendes zeigen: Wenn der Rezeptor  $GABA_{B1}$  durch den Botenstoff GABA – oder durch den Arzneistoff Baclofen, einen verwandten pharmakologischen  $GABA_{B1}$ -Agonisten –, aktiviert wird, hemmt das die Sensibilisierung des Capsaicin-Rezeptors. Er wird dadurch wieder in seinen Ausgangszustand versetzt. In gewisser Weise stellt der Botenstoff GABA also eine natürliche Bremse für den Capsaicin-Rezeptor dar.

Das Besondere an diesem neu entdeckten Signalweg ist die differenzierte Wirkweise: Der Capsaicin-Rezeptor wird nicht komplett abgeschaltet, sondern seine erhöhte Reizbarkeit rückgängig gemacht. Die Nervenenden bleiben weiterhin empfänglich für äußere Reize und für Signale aus dem Körperinneren – zu den negativen Effekten einer Totalblockade des Rezeptors, etwa zur Hyperthermie, kann es nicht kommen.



PROF. DR. JAN SIEMENS leitet seit dem Jahr 2013 eine Arbeitsgruppe am Pharmakologischen Institut der Medizinischen Fakultät Heidelberg und ist Mitglied des Exzellenzclusters CellNetworks. Darüber hinaus gehört er der Molecular Medicine Partnership Unit (MMPU) an, einer gemeinsamen Einrichtung der Medizinischen Fakultät Heidelberg und des European Molecular Biology Laboratory (EMBL). Zuvor arbeitete er im Labor von Prof. David Julius an der University of California in San Francisco und baute eine unabhängige Nachwuchsforschergruppe im Max-Delbrück-Centrum in Berlin auf. Ein Schwerpunkt seiner Forschungsarbeiten ist die Frage, wie wir schmerzhaftige Temperaturereize detektieren. Ein zweiter Schwerpunkt ist das Verständnis der Regulation der Körpertemperatur. Im Jahr 2015 erhielten Jan Siemens und seine Mitarbeiter den Galenus-von-Pergamon-Preis, der die pharmakologische Forschung in Deutschland fördert.

Kontakt: [jan.siemens@pharma.uni-heidelberg.de](mailto:jan.siemens@pharma.uni-heidelberg.de)

OVERSTIMULATED NERVES

# A MOLECULE OUTMANOEUVRES PAIN

JAN SIEMENS

Sensing pain is important for our well-being: it constitutes a warning signal to prevent tissue damage by initiating protective reflexes – such as when we instinctively pull our hand away from a hot hob. Inflammation, injuries or tumours, on the other hand, may cause a pathological reaction that makes us hypersensitive to pain, until the pain becomes chronic. A central element in this process is known as the capsaicin receptor, which we investigate in our work group. This is a molecular sensor that is activated by heat, an acidic environment or pro-inflammatory messenger substances and that increases our sensitivity to pain signals. Substances which inhibit this receptor show analgesic effects. However, the active agents tested to date can only deactivate the capsaicin receptor completely – which apparently leaves nerve cells unable to register the body's temperature. Consequently, we can no longer perceive pain signals caused by heat, our heat regulation fails and our body temperature rises sharply.

With our Heidelberg approach, which comprises methods from the fields of molecular biology, biochemistry and genetics, we were able to uncover a mechanism that might be able to decrease the heightened sensitivity of the receptor without blocking it completely: not a 'stop', but rather a controlled 'go'. We identified another receptor – the GABA<sub>B1</sub> receptor – that acts as partner to the capsaicin receptor and proved that the activation of this second receptor specifically prevents and counteracts sensitization of the capsaicin receptor without interfering with important regulating processes in the body. Future studies will have to reveal whether these promising findings hold any potential for analgesic treatment and/or the prevention of inflammatory pain. ●

PROF. DR JAN SIEMENS has been heading a work group at the Institute of Pharmacology (Medical Faculty Heidelberg) since 2013 and is a member of the 'CellNetworks' Cluster of Excellence. In addition, he is part of the Molecular Medicine Partnership Unit (MMPU), a joint venture of the Medical Faculty Heidelberg and the European Molecular Biology Laboratory (EMBL). He previously worked in the lab of Professor David Julius at the University of California in San Francisco and established an independent junior research group at the Max Delbrück Center for Molecular Medicine in Berlin. His research focuses on the question of how we detect painful temperature stimuli and on understanding the regulation of body temperature. In 2015 Jan Siemens and his team received the Galenus von Pergamon Prize, which supports pharmacological research in Germany.

Contact: [jan.siemens@pharma.uni-heidelberg.de](mailto:jan.siemens@pharma.uni-heidelberg.de)

**“We have found a new way of downregulating a hyperactive pain receptor so that it can continue to transmit signals in a restricted manner: not a ‘stop’, but rather a controlled ‘go’.”**

Was wir gefunden haben, ist ein neuer Weg, der es erlaubt, einen überaktiven Schmerz-Rezeptor so zu bremsen, dass er dennoch gedrosselt weiterhin Signale liefern kann: statt eines kompletten „Stop“ also ein geregeltes „Go“. Damit stellt der neu entdeckte Signalweg eine vielversprechende Ansatzmöglichkeit dar, um die Schmerzüberempfindlichkeit auf Ebene der Nervenenden zu dämpfen, ohne wichtige Regulationsprozesse im Körper zu stören. Es ist beispielsweise vorstellbar, eine GABA-ähnliche Substanz zu entwickeln, deren Verteilung auf die Peripherie beschränkt ist und die nicht in das zentrale Nervensystem übertritt. So lassen sich unerwünschte zentrale Effekte vermeiden. Der Arzneistoff Baclofen etwa, ein spezifischer GABA<sub>B1</sub>-Agonist, könnte zwar als eine solche Leitsubstanz dienen, beschränkt seine Wirkung aber nicht allein auf die Nervenenden, sondern gelangt auch in das zentrale Nervensystem und weist deshalb starke Nebeneffekte auf.

Ein alternativer Weg wäre, eine Substanz zu entwickeln, welche die Freisetzung des endogenen Botenstoffes GABA fördert. Ein Medikament, das die besondere Zusammenarbeit des GABA<sub>B1</sub>- mit dem Capsaicin-Rezeptor ausnutzt

**„Womöglich lässt sich der neue Mechanismus auch nutzen, um chronischen Schmerzen, beispielsweise infolge operativer Eingriffe, vorzubeugen.“**

und simuliert, ist ebenfalls denkbar. Therapieansätze, die diesen Mechanismus in Gang setzen, könnten zum Beispiel dort helfen, wo der Schmerzauslöser und damit die Sensibilisierung der Nervenenden dauerhaft bestehen bleibt, wie es bei chronischen Entzündungen oder Tumoren der Fall ist. Womöglich ließe sich der neue Mechanismus auch nutzen, um chronischen Schmerzen, beispielsweise infolge operativer Eingriffe, vorzubeugen. Bis zum Nachweis, dass dieser Ansatz auch beim Menschen greift, ist es allerdings ein langer Weg mit sicherlich noch vielen „Stops“ und „Gos“. ●

**Herausgeber**

Universität Heidelberg  
Der Rektor  
Kommunikation und Marketing

**Wissenschaftlicher Beirat**

Prof. Dr. Peter Comba (Vorsitz)  
Prof. Dr. Beatrix Busse  
Prof. Dr. Markus Hilgert  
Prof. Dr. Nikolas Jaspert  
Prof. Dr. Marcus A. Koch  
Prof. Dr. Carsten Könneker  
Prof. Dr. Alexander Marx  
Prof. Dr. Thomas Pfeiffer  
Prof. Dr. Joachim Wambsganß  
Prof. Dr. Reimut Zohlhöfer

**Redaktion**

Marietta Fuhrmann-Koch  
(verantwortlich)  
Ute von Figura (Leitung)  
Claudia Eberhard-Metzger

**Gestaltung und Reinzeichnung**

KMS TEAM GmbH, München

**Druck**

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen

**Auflage**

6.000 Exemplare

**ISSN**

0035-998 X

**Vertrieb**

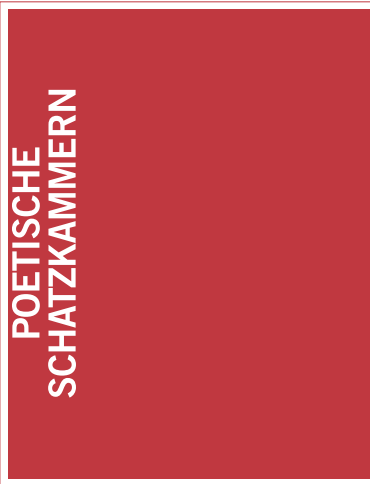
Universität Heidelberg  
Kommunikation und Marketing  
Grabengasse 1, 69117 Heidelberg

Tel.: +49 6221 54-19026

kum@uni-heidelberg.de

Das Magazin kann kostenlos unter oben genannter Adresse abonniert werden.

Im Internet ist es verfügbar unter [www.uni-heidelberg.de/rupertocarola](http://www.uni-heidelberg.de/rupertocarola).



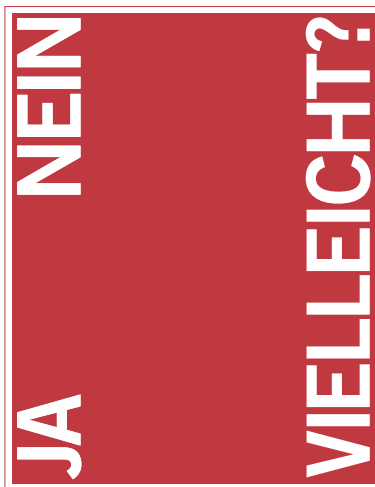
LITERATURGESCHICHTE  
**POETISCHE SCHATZKAMMERN**  
TRADITION ALS MOTOR  
DIRK WERLE

**112**



SPRACHWISSENSCHAFT  
**GEBURT, TOD UND AUFERSTEHUNG**  
VOM LEBENSZYKLUS DER SPRACHEN  
WERNER ARNOLD & GERRIT KLOSS

**120**



URTEILS- UND ENTSCHEIDUNGSFORSCHUNG  
**JA, NEIN, VIELLEICHT?**  
ZWISCHEN DEN STÜHLEN  
SILKE HERTEL, INGRID SCHOBERTH & GERHARD DANNECKER

**130**



GERONTOLOGIE  
**WIE LANGE NOCH?**  
AM ENDE DES LEBENS  
ANDREAS KRUSE

**138**



# SCHLUSSSPRUNG



# POETISCHE SCHATZKAMMERN

POETISCHE SCHATZKAMMERN

# TRADITION ALS MOTOR

DIRK WERLE

**Tradition ist ein wesentlicher Antriebsfaktor der Literaturgeschichte. Sie ist „Go!“ und nicht „Stop!“, denn auf ihr beruht die Dynamik, die die Literaturgeschichte vorantreibt. Ein neues Promotionskolleg an der Universität Heidelberg untersucht vielfältige Formen des literarischen Umgangs mit Tradition und erprobt dabei die Tragfähigkeit unseres Traditionsbegriffs.**



Im Jahr 1633 erschien im Verlag der Buchhandlung von David Müller in Breslau ein Band mit dem Titel „Trost-Gedichte in Widerwertigkeit Deß Krieges“. Es handelte sich um ein etwa hundert Seiten umfassendes Langgedicht in Alexandrinerversen, in dem den Lesern mit den unterschiedlichsten argumentativen Mitteln nahegelegt wurde, auf welche Art und Weise sie in der Situation des bereits viele Jahre andauernden Krieges Trost erlangen konnten. Der Sprecher des Gedichts ruft zu Beginn den Heiligen Geist an und bittet ihn, ihm dabei zu helfen, das „neue Feld“ zu durchheilen, auf das vor ihm noch niemand seinen Fuß gestellt habe. Martin Opitz (1597–1639), denn niemand geringerer ist der Verfasser des Trostgedichts, behauptet also, mit seinem Unternehmen etwas ganz Neues, nie Dagewesenes ins Werk gesetzt zu haben. Doch der aufmerksame Leser wird schnell skeptisch: Was man da liest, das klingt verdächtig wie ein Musenanruf in einem antiken Versepos. Und in der Tat wird beim Weiterlesen schnell klar, dass Opitz ein Lehrepos in der Tradition von Vergils „Georgica“ konzipiert hat und diesen Traditionsbezug durch verschiedene Hinweise deutlich macht, angefangen mit der charakteristischen Aufteilung in vier Bücher. Den traditionellen Musenanruf besetzt Opitz um, indem er an die Stelle der Muse den Heiligen Geist treten lässt und damit programmatisch ein christliches Versepos einleitet. Die Ersetzung der Muse durch den Heiligen Geist ist ein genialer Schachzug, denn wie die Muse der antiken Dichtung ist der Heilige Geist der Bibel die überirdische Instanz, die dafür zuständig ist, den Auserwählten eine Stimme zu geben und die Macht der zwischen göttlicher und menschlicher Sphäre vermittelnden Rede zu verleihen.

Nun erhebt Martin Opitz mit seinem Text durchaus nicht den Anspruch, die poetische Gattung Versepos zu erfinden; er stellt sich ganz explizit in die antike Gattungstradition. Das „neue Feld“, von dem er spricht, ist das Versepos in deutscher Sprache. So etwas habe vor ihm niemand versucht. Literaturhistoriker wissen, dass das nicht stimmt. Bereits vor Opitz gibt es Bestrebungen, Versepen in deutscher Sprache zu erschaffen, angefangen bei den Übersetzungen antiker Epen in deutsche Verse – etwa Simon Schaidenreissers 1537 veröffentlichte „Odyssea“ oder auch Jörg Wickrams 1545 erschienene Bearbeitung der mittelalterlichen Übersetzung von Ovids „Metamorphosen“ durch

**„Literaturgeschichte  
ist wesentlich  
dadurch charakterisiert,  
dass sie sich über  
Formen des  
kreativen Rückbezugs  
konstituiert.“**

Albrecht von Halberstadt – bis hin zu den Versuchen, originale deutschsprachige Versepen zu kreieren, etwa Johann Fischarts zuerst 1576 publiziertes „Glückhafft Schiff von Zürich“ oder auch Caspar von Barths 1626 veröffentlichter „Deutscher Phoenix“. Opitz stellt also in seinem Trostgedicht eine unzutreffende Innovationsbehauptung auf, und man kann ihm nicht zugutehalten, dass er das in Unkenntnis der Vorläufer getan hätte – zumindest Barth und dessen Schriften kannte er nachweislich sehr gut.

In einer anderen Hinsicht ist Opitz' Unternehmen dann aber doch neu, nämlich insofern, als er zwei klassische Gattungsformen unkonventionell kreuzt: Sein Trostgedicht steht in der Tradition des Lehrepos, da es in Gestalt literarischer Belehrungen Kenntnisse vermittelt; es steht aber ebenso in der Tradition des Kriegs- und Heldenepos nach dem Vorbild von Homers „Ilias“ und „Odyssee“: Der Krieg ist sein Thema, im Text finden sich Anspielungen auf die Heroen antiker Heldenepen, und es wird das Bild eines gegenüber der antiken Konzeption alternativen Heldenbildes entworfen, nämlich das Bild des nicht aktiven, sondern duldbaren Heroen, der die Zumutungen der widrigen Wirklichkeit stoisch erträgt.

#### Vom Umgang mit Tradition

An diesem Beispiel kann man manches über das Wesen von Innovationen und das Funktionieren von Traditionen in der Literaturgeschichte aufzeigen: Wenn jemand eine Innovation behauptet, dann heißt das nicht unbedingt, dass diese Behauptung auch zutrifft. Das ist eigentlich eine Selbstverständlichkeit, die aber bisweilen mit Blick auf historische Texte – faktuale wie fiktionale – vergessen wird. Bei ihnen besteht die verbreitete Neigung zu glauben, was darin steht, vor allem auch, wenn es sich um die Texte nicht ganz unbekannter Autoren handelt, denen man einen gewissen Autoritätsbonus zuschreibt. Darüber hinaus können wir aus dem Beispiel lernen, dass es Formen von Innovation gibt, die auf aktivem Umgang mit Traditionen beruht, etwa in Gestalt ihrer Mischung. Es wäre darüber nachzudenken, ob es in der Literaturgeschichte überhaupt so etwas wie radikale Innovationen gibt, die mit einem Schlag in die Welt kommen. Viele Literaturhistorikerinnen und Literaturhistoriker wären da vielleicht eher skeptisch.

Schließlich kann man am Beispiel von Opitz' Trostgedicht erkennen, dass sich Autoren mit ihren Texten in unterschiedlicher Weise gegenüber existierenden Traditionen verhalten können: Sie können bestehende oder auch vergangene Traditionen aufgreifen, sie aktualisieren, in neue Bereiche transferieren oder in Teilen umbesetzen. Der Literaturwissenschaftler Wilfried Barner hat für derartige Formen des Umgangs mit Traditionen den Begriff des „Traditionsverhaltens“ erfunden. Traditionsverhalten kann in der Orientierung an klassischen Vorbildern (das nannte

„Gibt es überhaupt so etwas wie radikale Innovationen, die mit einem Schlag in die Welt kommen?“



PROF. DR. DIRK WERLE hat seit dem Jahr 2015 die Professur für Neuere deutsche Literatur mit dem Schwerpunkt Frühe Neuzeit am Germanistischen Seminar der Universität Heidelberg inne. Zuvor arbeitete er an den Universitäten Siegen, Leipzig und Jena sowie an der Humboldt-Universität zu Berlin. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Wechselbeziehungen von Wissenschaft und Literatur seit der Frühen Neuzeit, die literaturwissenschaftliche Methodologie, Aspekte der Geschichte literarischer Gattungen in der Frühen Neuzeit sowie die Literaturgeschichte semantischer Einheiten. Dirk Werle ist Sprecher des im Wintersemester 2016/2017 gegründeten Promotionskollegs „Was ist Tradition? Zu Genese, Dynamik und Kritik von Überlieferungskonzepten in den west-europäischen Literaturen“.

Kontakt: [dirk.werle@gs.uni-heidelberg.de](mailto:dirk.werle@gs.uni-heidelberg.de)

# „Prophetie gibt es in der Literaturgeschichte nicht. Inhalte, Formen, Motive und Argumente lassen sich nicht abgelöst von ihren historischen Kontexten betrachten.“

man früher „imitatio“) bestehen, im Wettstreit mit oder in der Überbietung von Vorangegangenen (früher: „aemulatio“), im Anknüpfen bei gleichzeitigem Hinausgehen über einen Vorläufer, darüber hinaus in alternativen Formen des Dialogs mit Vorangegangenen, aber auch im expliziten Negieren von Tradition, in Formen des emphatischen Traditionsbruchs oder auch in Spielarten von Traditionskritik, schließlich in der Konstruktion neuer oder alternativer Traditionen. Auch Kodifikationen des Erreichten sind eine Form des Umgangs mit der Tradition; so war etwa die von Opitz selbst als neuartig bezeichnete Art zu dichten im 17. Jahrhundert so erfolgreich, dass ihn zunächst zahlreiche Autoren imitierten und die Vielgestalt dieser Literatur schließlich in sogenannten „Poetischen Schatzkammern“ dokumentiert wurde – Wörterbüchern, die schöne Wörter und Wendungen aus der zeitgenössischen Dichtung sammelten, ordneten und erschlossen.

Traditionsverhalten kann sich auf unterschiedliche Bereiche der Literatur beziehen. Gegenstände des Traditionsverhaltens können nach Wilfried Barner erstens Inhalte im weitesten Sinne sein, inklusive Normen und Werten sowie Regeln der Produktion, Rezeption und Beurteilung von Texten; zweitens Formen der Texttradierung, etwa vermittelt über Kanonisierung, Traditionsorte oder das

Bildungswesen; drittens Autoren und ihr Nachleben, ihr Ruhm; viertens Textelemente wie Stoffe, Motive, Topoi, Theoreme, Argumente und Formate. Literaturgeschichte ist wesentlich dadurch charakterisiert, dass sie sich über Traditionen und unterschiedliche Formen des Traditionsverhaltens konstituiert, also über den kreativen Rückbezug. Was es hingegen nicht gibt, obwohl manche Menschen davon sprechen, sind Formen des „Vorwegnehmens“. Der Ideenhistoriker Quentin Skinner hat gezeigt, dass die Rede vom Vorwegnehmen sinnlos ist. Prophetie gibt es in der Literaturgeschichte nicht, und die Rede vom Vorwegnehmen ist anachronistisch, indem sie so tut, als ließen sich Inhalte, Formen, Motive und Argumente abgelöst von ihren jeweiligen historischen Kontexten betrachten.

## Überlieferungskonzepte im Fokus

Mit dem Ziel, Formen des literarischen Umgangs mit Tradition von der Antike bis in die Moderne zu untersuchen, ist an der Universität Heidelberg jüngst ein aus Mitteln der Landesgraduiertenförderung finanziertes komparatistisches Promotionskolleg angelaufen. Es trägt den Titel „Was ist Tradition? Zu Genese, Dynamik und Kritik von Überlieferungskonzepten in den westeuropäischen Literaturen“ und nimmt vielfältige Textgattungen sowie -stile in den Blick: von der antiken lateinischen

POETIC TREASURE TROVES

# TRADITION AS MOTOR

DIRK WERLE

Tradition is an essential driving factor in the history of literature; far from putting a stop to the efforts of countless writers, it has time and again spurred them to go forward. One of the defining characteristics of literary history is the fact that it is based on traditions and various forms of ‘traditional behaviour’, i.e. on creative ways of connecting with the past. Traditions do not simply exist; in the process of literary history, they are created dynamically by the behaviour of the writers. Traditional behaviour may consist in imitating classic role models, competing with or surpassing antecedents, or building on – while going beyond – a precursor; it may include alternative forms of dialogue with antecedents, but also the explicit negation of tradition, emphatic breaks with tradition or various forms of tradition criticism, and finally the construction of new or alternative traditions.

A new research training group at Heidelberg University entitled ‘What is Tradition? On the Formation and Critique of Concepts of Textual Transmission in Western European Literatures’ examines the many ways in which literature deals with tradition and puts the term of tradition itself up for discussion: Is tradition a methodological concept that can be used dispassionately to describe the history of literature? Or should it not rather be regarded emphatically and affirmatively as a concept that can be given substance in different ways and whose concrete definition should not be left to die-hard traditionalists? Or is a critical view in order, one that reveals the concept’s conservative, homogenising, but in any case ideological nature, which disregards static or minority perspectives? In case studies ranging from ancient to modern times, Heidelberg scientists test the viability of the concept of tradition for a sophisticated approach to the writing of literary history. ●

PROF. DR DIRK WERLE is Professor of Modern German Literature with special focus on the early modern period at Heidelberg University's Department of German Language and Literature. Before accepting the Heidelberg chair in 2015, he worked at the universities of Siegen, Leipzig and Jena and at Humboldt University in Berlin. His research interests include the interrelations between science and literature since the early modern period, the methodology of literary criticism, aspects of the history of literary genres in the early modern period and the literary history of semantic units. Dirk Werle is Speaker of the research training group 'What is Tradition? On the Formation and Critique of Concepts of Textual Transmission in Western European Literatures' that was established in the winter term 2016/2017.

Contact: [dirk.werle@gs.uni-heidelberg.de](mailto:dirk.werle@gs.uni-heidelberg.de)

**“One of the defining characteristics of literary history is the fact that it is based on traditions and various forms of traditional behaviour, i.e. on creative ways of connecting with the past.”**



Versepiq über den Typus des fahrenden Schülers in Schriften der Vormoderne sowie Formen des Petrarkismus – eine den mittelalterlichen Minnesang ablösende neue Art der Liebesdichtung – in der französischen und portugiesisch-spanischen Romanliteratur der Frühen Neuzeit bis zur Lyrik der Wiener Moderne, den Neostilen der deutschsprachigen Jahrhundertwendeliteratur und den Werken T.S. Eliots.

Auch das Konzept „Tradition“ selbst steht im Rahmen unserer Forschungen in der Diskussion: Handelt es sich um ein nüchtern benutzbares methodologisches Konzept zur Beschreibung der Literaturgeschichte? Oder sollte es nicht vielmehr emphatisch und affirmativ verstanden werden als Konzept, das in unterschiedlicher Weise gefüllt werden kann und dessen konkrete Ausgestaltung nicht ewiggestrigen Traditionalisten überlassen werden sollte? Oder aber ist nicht vielmehr eine kritische Sicht auf das Konzept angebracht, die dessen tendenziell konservative, homogenisierende, statische und minoritäre Perspektiven ausklammernde, jedenfalls aber ideologische Natur aufdeckt? In Fallstudien von der Antike bis zur Moderne erproben wir die Tragfähigkeit des Traditionsbegriffs für eine anspruchsvolle Konzeption der Literaturgeschichtsschreibung. Es geht dabei um Funktionsweisen poetischer Topik, die Signifikanz literarischer Motive, das Traditionsverhalten von Autoren, die Rolle von literarischen Gattungen im Traditionsprozess, die Traditionsgeschichte kanonischer Texte und die Bedeutung literarischer Stile.

Gegenüber der etablierten literaturwissenschaftlichen Rezeptionsforschung hat unsere Traditionsforschung dabei einen allgemeineren Fokus: Traditionsbildung funktioniert über Momente der Rezeption, aber auch der Produktion literarischer Texte. Zudem geht eine am Leitkonzept der Tradition orientierte Literaturgeschichte davon aus, dass die Dynamik literarischer Entwicklung etwas ist, das durch die Intentionen von Akteuren bedingt ist: Ein Akteur greift einen bestimmten Traditionsbestand aus bestimmten Gründen und mit einem bestimmten Ziel auf und entwickelt ihn weiter, besetzt ihn um oder interpretiert ihn neu. Eine Konzeption von Traditionsforschung, wie sie dem Programm des Promotionskollegs zugrunde liegt, geht nicht davon aus, dass es gilt, herausragende Leistungen der Kulturgeschichte entstellungsgeschichtlich zu erklären, sondern davon, dass die Dynamik der kulturellen Ressourcen in ihrer Geschichte der zentrale Fokus literaturhistorischer Rekonstruktion sein muss.

Darüber hinaus basiert unsere Erforschung literarischer Traditionen auf der Annahme, dass Traditionen nicht in synchrone Diskursformationen eingebettet sind, sondern dass sie sich durch ein dynamisches Ineinander des vielfältigen Aufgreifens, Umbesetzens und Weiterentwickelns von Formelementen und semantischen Einheiten heraus-

## „Tradition ist der Nährboden für die Dynamik, die die Literaturgeschichte vorantreibt.“

bilden. Gerade bedeutende Heidelberger Gelehrte wie Hans-Georg Gadamer, Reinhart Koselleck und Jan Assmann haben in der Vergangenheit die zentrale Rolle von Tradition als Voraussetzung des historischen Verstehens, als Motor gesellschaftshistorischer Prozesse und als Bestandteil des kulturellen Gedächtnisses herausgearbeitet. Darauf aufbauend fragt das Promotionskolleg „Was ist Tradition?“ nach der Dynamik und der kommunikativen Rolle von literarischen Traditionen in gesellschaftlichen und kulturellen Zusammenhängen.

Was ist Tradition? Diese kulturhistorisch zentrale Frage lässt sich nicht allein durch den Blick ins Wörterbuch beantworten, sondern sie erfordert historische Detailarbeit an repräsentativen Fallstudien. Eine solche Detailarbeit unternimmt für den Bereich der Literaturgeschichte das Promotionskolleg „Was ist Tradition?“. Dabei ist die Antwort auf die Frage noch keineswegs vorentschieden. Eines aber ist klar: Tradition ist in der Literaturgeschichte keine Sache des „Stop“, sondern eine des „Go“, denn auf ihr beruht die Dynamik, die die Literaturgeschichte vorantreibt. ●

**GEBURT**

**TOD**

**UND AUFERSTEHUNG**

GEBURT, TOD UND AUFERSTEHUNG



**PROF. DR. WERNER ARNOLD** ist seit Oktober 1999 Professor für Semitistik am Seminar für Sprachen und Kulturen des Vorderen Orients der Universität Heidelberg. Seine wissenschaftliche Laufbahn begann mit dem Studium der Islamwissenschaft, Semitistik und Angewandten Linguistik Englisch an der Universität Erlangen-Nürnberg. Im Jahr 1985 ging er für einen zweijährigen Forschungsaufenthalt in die Aramäerdörfer des Qalamün nach Syrien. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Semitistik der Universität Heidelberg, danach am Institut für außereuropäische Sprachen und Kulturen der Universität Erlangen-Nürnberg. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der arabischen Dialektologie und dem Neuaramäischen. Er ist Herausgeber der „Zeitschrift für arabische Linguistik“ und Mit-Herausgeber der „Mediterranean Language Review“.

Kontakt: werner.arnold@ori.uni-heidelberg.de

# VOM LEBENSZYKLUS DER SPRACHEN

WERNER ARNOLD &amp; GERRIT KLOSS

**Sprachen befinden sich in einem kontinuierlichen Wandel, manche Sprachen entstehen neu, andere sterben gar aus. Doch wie gehen diese Prozesse vonstatten? Was hat es mit der Geburt einer Sprache auf sich? Und ab wann gilt eine Sprache als tot? Heidelberger Linguisten untersuchen die komplexen Dynamiken von Stillstand und Bewegung, von Werden und Vergehen, denen Sprachentwicklung unterliegt. Im Zentrum ihrer Betrachtungen stehen dabei das Aramäische und das Lateinische.**



**PROF. DR. GERRIT KLOSS** studierte Klassische Philologie sowie Allgemeine und Vergleichende Sprachwissenschaft an den Universitäten Göttingen, Tübingen und Florenz. Nach Promotion und Habilitation in Göttingen führte ihn sein Weg über die Zwischenstation Köln im Jahr 2002 an die Universität Heidelberg, wo er im Folgejahr auf den deutschlandweit einzigen Lehrstuhl für Klassische Philologie mit dem Schwerpunkt Lateinische und Griechische Sprachwissenschaft berufen wurde. Sein Hauptinteresse gilt formalen Zugängen zu literarischen Texten mit den Methoden von Sprachtheorie, Grammatik, Metrik, Rhetorik und Textkritik. Seine Forschungen erstrecken sich auf eine Vielzahl von Gattungen, unter anderem Komödie, Epos, Lehrgedicht, Epigramm und Geschichtsschreibung.

Kontakt: gerrit.kloss@skph.uni-heidelberg.de



Über die Zahl der heute auf dem Erdball gesprochenen Sprachen gibt es weit divergierende Schätzungen. Nimmt man einen Mittelwert, mögen es etwa 6.000 sein. Doch ihre Zahl verringert sich derzeit schnell. Man vermutet, dass im 21. Jahrhundert, vor allem aufgrund der fortschreitenden Globalisierung, mindestens die Hälfte aller Sprachen weltweit sterben wird. Dem werden nur wenige Neuzugänge gegenüberstehen.

Intuitiv meinen wir zu wissen, was die Rede vom „Tod“ und von der „Geburt“ von Sprachen bedeutet – zwei Metaphern, die Sprachen als Organismen begreifen. Allerdings hinkt der Vergleich der sozialen Institution Sprache mit dem Leben eines Menschen. Unter Geburt und Tod verstehen wir scharfe Zäsuren, die die Spanne eines Lebens begrenzen: Lebendig ist das, was geboren und nicht gestorben ist. Aber wie und wann wird eine Sprache geboren? Schon Wilhelm von Humboldt (1767–1835) stellte fest, „dass man wohl noch keine Sprache jenseits der Gränzlinie vollständiger grammatischer Gestaltung gefunden, keine in dem flutenden Werden ihrer Formen überrascht hat“. Sprachen gibt es nicht in embryonalen oder kindlichen Zuständen, sie sind immer schon „erwachsen“, wenn wir auf sie schauen. Deshalb können sie auch nicht eigentlich „geboren“ werden, allerdings in einem anderen Sinne durchaus „entstehen“, wie wir später erläutern werden.

### Vom Sterben der Sprachen

Der französische Linguist Claude Hagège sagt zum Bild der „toten“ Sprache: „To be alive and to exist are two different ideas [...]. A language termed dead is nothing other than a language that has lost [...] the use of speech. But we have no right to equate its death with that of a dead animal or plant. Here, the metaphors reach their limit. Because a dead language continues to exist.“ Dennoch hat es sich eingebürgert, eine Sprache als tot zu bezeichnen, wenn sie nicht mehr an die nächste Generation weitergegeben wird. Als Muttersprache ist sie spätestens mit ihrem letzten Sprecher gestorben. Eine folgende Generation kann dann zwar noch

#### Semitisches Tonarchiv

Im Semitischen Tonarchiv der Universität Heidelberg sind mehr als 2.000 Aufnahmen semitischer Sprachen und Dialekte aus zwanzig Ländern digital erfasst. Ziel der Sammlung ist es, aussterbende Sprachen als kulturelles Erbe der Menschheit vor dem endgültigen Verlust zu bewahren und über das Internet für die Forschung zugänglich zu machen. Das Tonarchiv gehört der Abteilung Semitistik am Seminar für Sprachen und Kulturen des Vorderen Orients an und wurde mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft aufgebaut.

[www.semarch.uni-hd.de](http://www.semarch.uni-hd.de)

Kenntnisse dieser Sprache haben, sie vielleicht auch noch verstehen, aber nicht mehr sprechen. Das ist aktuell zum Beispiel beim aramäischen Mlaḥsô und bei vielen arabischen Dialekten in der Türkei der Fall. Sterben auch hier die letzten Generationen, ist es nur noch möglich, die Sprachen in Tonbandaufzeichnungen zu erhalten. Für die semitischen Sprachen und Dialekte ist dies gelungen: Im Heidelberger Tonarchiv des Seminars für Sprachen und Kulturen des Vorderen Orients sind umfassende Aufnahmen aus zwanzig Ländern digital erfasst und der Nachwelt zugänglich.

Insbesondere Sprachen mit niedrigem Prestige sind vom Sterben bedroht. Die US-amerikanische Sprachwissenschaftlerin Nancy Dorian schreibt etwa zur Verdrängung des Gälischen durch das Englische: „As English pressed in from the top of the social hierarchy and spread steadily downward, Gaelic retreated to the bottom of the social hierarchy and gradually became the hallmark of the [...] poor.“ Bei den schriftlosen semitischen Sprachen der arabischen Halbinsel, wie Šḥeri und Mehri, verhält es sich ganz ähnlich. Doch auch weitverbreitete und prestigereiche Sprachen können unter den Druck noch stärkerer Konkurrenz geraten: Das Aramäische verdrängte im ersten Jahrtausend vor Christus alle anderen Sprachen im Nahen Osten – Hebräisch, Phönizisch, Assyrisch, Babylonisch und Hethitisch –, um dann selbst mit der Ausbreitung des Islams dem Arabischen zu weichen.

Mitunter existieren während eines solchen Verdrängungsprozesses zwei Sprachen sehr lange friedlich nebeneinander. In Mesopotamien trat offenbar um 2800 vor Christus das Akkadische neben das dominierende Sumerische, das etwa 800 Jahre später aus dem Alltagsgebrauch verschwand und nur noch in der Schrift als Kult-, Literatur- und Gelehrtensprache weiterlebte. Der früheste dokumentierte Sprachtod scheint somit ein sanfter gewesen zu sein. Gleiches gilt für das Lateinische auf dem Balkan: Die seit dem Frühmittelalter voranschreitende Slawisierung der romanischen Gebiete nördlich von Griechenland und Albanien verlief überwiegend friedlich. Südlich und westlich der Donau gibt es noch heute Reste mit dem Rumänischen verwandter Mundarten; der dalmatische Zweig des Balkanromanischen überlebte immerhin bis 1898.

#### Beschleunigter Untergang

Externe Faktoren wie Krieg und Vertreibung können den Untergang einer gefährdeten Sprache dramatisch beschleunigen, indem Sprecher getötet oder in die Diaspora getrieben werden, wo ihre kleinen Sprachgemeinschaften zerfallen. Ein regelrechter Genozid hat 1915 in der Osttürkei zum Untergang zahlreicher aramäischer Dialekte geführt. Im Dorf Mlaḥsô aber gab es einige Überlebende, sodass zumindest der dortige Dialekt von dem deutschen Semitisten Otto Jastrow noch beschrieben werden konnte, bevor der

letzte Sprecher im Jahre 1999 starb. Einen langsamen Tod erleiden auch die jüdisch-aramäische Dialekte des Irak, nachdem alle Juden im Jahre 1951 das Land verlassen mussten. Heute gibt es keine jungen Sprecher dieser Dialekte mehr in Israel.

Auch anhaltender kulturpolitischer Druck kann Sprachen zusetzen. Die lange praktizierte zentralistische Sprachpolitik in Frankreich hat viele einst verbreitete Regionalsprachen, wie Bretonisch oder Okzitanisch, stark in die Defensive gedrängt. Der französische Bischof und Politiker Henri Grégoire präsentierte 1794 seinen „Rapport sur la Nécessité et les Moyens d’anéantir les Patois et d’universaliser l’Usage de la Langue française“, der Gesetzeskraft bekam und auf rabiate Weise das von nur zwölf Prozent der Bevölkerung Frankreichs gesprochene (Pariser) Französisch als alleinige Sprache durchsetzen sollte. Erst nach dem Zweiten Weltkrieg rückte man von diesem Ziel ab. Die „Europäische Charta der Regional- oder Minderheitensprachen“ von 1992 hat Frankreich zwar 1999 unterzeichnet, aber bis heute nicht ratifiziert.

Hingegen versuchten die Römer der Antike zu keiner Zeit, die in den eroberten Provinzen angetroffenen Regionalsprachen durch das Lateinische zu ersetzen. Im Osten blieb ohnehin die Weltsprache Griechisch dominant; im Westen gaben Etrusker, Italiker, Gallier und Germanen ihre Sprachen freiwillig zugunsten des angesehenen Lateinischen auf. Nur Inselkeltisch, Baskisch und Albanisch, alle in unwegsamem Gelände beheimatet, haben diesem zivilisatorischen Sog dauerhaft widerstanden.

Aber das sind seltene Ausnahmen. In der Regel leiden kleinere Sprachen unter der Nachbarschaft einer wichtigen überregionalen Verkehrs- und Kultursprache. Häufig schrumpfen dann ihre ursprünglich geschlossenen Verbreitungsgebiete und zerfallen in dialektal auseinanderstrebende Inseln, was ihren Niedergang weiter beschleunigt. Selbst das seit 1945 sprachpolitisch gut gestellte Sorbische in Sachsen und Brandenburg ist mittlerweile fast völlig in das stark bedrohte Niedersorbische und das stabilere Obersorbische gespalten, da es im Übergangsgebiet kaum noch Sprecher gibt. Das ehemals kompakte Sprachkontinuum des Friesischen ist heute in drei untereinander nicht mehr verständliche Idiome zerfallen: das vitale Westfriesische in den Niederlanden, das fast verschwundene Ostfriesische im Saterland und das als „ernsthaft gefährdet“ eingestufte Nordfriesische.

#### Totes Latein?

Das Lateinische, heute so etwas wie der Inbegriff einer toten Sprache, ist, von regionalen Gebietsverlusten wie in Britannien, Nordafrika und auf dem Balkan abgesehen, keinen dieser Tode gestorben – im Gegenteil: Die zu eigenen Sprachen ausdifferenzierten Dialekte des Volks-

**„Im 21. Jahrhundert wird, vor allem aufgrund der fortschreitenden Globalisierung, mindestens die Hälfte aller Sprachen weltweit sterben.“**

lateins der Antike und des frühen Mittelalters werden bis heute in ungebrochener Kontinuität gesprochen, derzeit weltweit von circa 800 Millionen Muttersprachlern. Das „klassische“ Latein wiederum, das gemeinhin als „tot“ bezeichnet wird, repräsentiert gar nicht die gesprochene Sprache seiner Entstehungszeit im ersten vorchristlichen Jahrhundert – vielmehr ist es ein Seitenzweig der lateinischen Sprachgeschichte.

Klassisches Latein zeichnet sich durch die reiche Verwendung von Partizipialkonstruktionen sowie die ausladenden, sich zum Ende elegant rundenden Satzperioden mit zahlreichen Nebensätzen aus, die in der Sprache des Volkes zu keiner Zeit beliebt waren. Der Ausbau dieser Möglichkeiten zu Charakteristika einer gebildeten Hoch- und Schriftsprache ist einer dünnen Schicht von literarisch ambitionierten Römern wie Cicero und Caesar zu verdanken, die sich um die Entwicklung einer der griechischen ebenbürtigen Kunstprosa bemühten. Das Ergebnis unterschied sich merklich sowohl vom gesprochenen Umgangs- als auch vom schriftlichen Gebrauchslatein, blieb aber noch für

alle verständlich. Spätere Prosaiker entwickelten diese leicht artifizielle Varietät zunächst noch etwas weiter; eine Rückbindung an die sich verändernde Volkssprache blieb aber aus. Schließlich erhob Quintilian, der erste staatlich bestellte Rhetoriklehrer Roms, das zu seiner Zeit schon 150 Jahre alte ciceronianische Latein zum maßgeblichen Stilideal und leitete so dessen Siegeszug in den Schulen des Römischen Reiches und später ganz Europas ein. Das „beste“ Latein war damit weitgehend petrifiziert und den Einflüssen der sich natürlich entwickelnden Alltagssprache endgültig entzogen. Im Grunde war das konsequent, denn elitäre Abgrenzung gehörte von Beginn an zum Genom dieser Prosa.

Dem heute als „tot“ bezeichneten klassischen Latein war also nie ein Leben als Kommunikationsmedium breiter Schichten zugehört. Schon deshalb kann es nicht im linguistischen Sinne gestorben sein. Vielmehr verdankt es gerade der Abkopplung vom fluiden Volkslatein seine Dauerhaftigkeit als Bildungssprache.

Ein derartiges Fortleben als „klassische“ Kult- und Gelehrtensprachen war oder ist auch anderen im alltäglichen Gebrauch nicht (mehr) lebendigen Sprachen mit sehr hohem Prestige beschieden: beispielsweise unter den semitischen Sprachen dem Altsyrischen, dem klassischen Arabisch und dem klassischen Mandäisch, in Europa dem Altkirchenslawischen, in Asien dem klassischen Chinesisch und dem Sanskrit. Aber es gibt Unterschiede: Latein pflegt man als „tot“ zu bezeichnen, weil seine Tochtersprachen verschriftlicht wurden, eigene Literaturen hervorgebracht und in den meisten kulturellen und gelehrten Kontexten die Funktionen des Lateinischen übernommen haben. Das Hocharabische hingegen gilt als „lebendig“, weil sein Prestige als klassische und heilige Sprache bis heute verhindert hat, dass seine immer noch als „arabische Dialekte“ bezeichneten, längst stark diversifizierten Tochtersprachen verschriftlicht wurden (mit einer Ausnahme, dem Maltesischen). Die Sprecher dieser Tochtersprachen sind nach wie vor auf das Hocharabische als gemeinsames Schriftmedium angewiesen.

#### Kein Tod, sondern modifiziertes Weiterleben

Paradoxerweise gelten also manche ältere, zu „klassischem“ Nachleben gelangte Sprachzustände als „tot“, während wohl niemand das Urgermanische, das Alt- oder das Mittelhochdeutsche so bezeichnen würde, die allesamt nur ephemere Zwischenstadien der kontinuierlichen Entwicklung vom Indogermanischen zum heutigen Deutschen sind. Jedenfalls wäre diese Attribuierung nicht sinnvoller, als wollte man behaupten, der Teenager, der ein heute noch lebender Mensch vor Jahrzehnten war, sei tot. Das gilt erst recht für Einzelphänomene wie Wörter oder Morpheme. Seit über 2.000 Jahren benutzt man in Italien in ungebrochener Kontinuität von Lautung, Morphologie und Semantik die Form „dico“

(ich sage). Und lateinisch „necare“ (töten) hat sich zwar lautlich und semantisch zu französisch „noyer“ (ertränken) verschoben, aber man würde diese Entwicklung sicher nicht mit den Begriffen „Tod“ und „Geburt“ beschreiben.

Nicht einmal ausgestorbene Sprachen ohne klassisches Nachleben sind in jeder Hinsicht tot: Oft leben sie als Substrat in Wortschatz, Morphologie und Syntax einer anderen Sprache weiter. Das sumerische Wort „mar“ (Schaufel, Spaten) hat es über akkadisch „marrum“, aramäisch „marra“, griechisch „μαρρα“ und lateinisch „marra“ geschafft, bis heute in den romanischen Sprachen zu überleben: als französisch „marre“ und italienisch „marra“. Die Lautverschiebung von langem ā zu ö im Phönizischen hat sich nach dessen Aussterben im Westaramäischen erhalten und findet sich sogar bis heute in vielen arabischen Dialekten des Libanon. Die Substrate, auf die das Lateinische in den römischen Provinzen traf, wirkten als Katalysatoren der dialektalen Ausdifferenzierung, die zur Entwicklung der romanischen Einzelsprachen beitrug: Das untergehende Festlandkeltische beeinflusste vermutlich die Aussprache und den Wortschatz des nachrückenden Lateinischen in einer Weise, die Merkmale des späteren Französischen erklären könnte, etwa den Lautwandel von lateinisch [u:] zu [y:], der sich gerade in den einst gallischsprachigen Gebieten vollzog. Es gibt wohl kaum eine sterbende Sprache, die keine Spuren in der sie verdrängenden Sprache hinterlässt. Substrate sind potenzielle Keimzellen einer Herausbildung von Dialekten. In ihnen erscheinen Sprachtod und Sprachgeburt als zwei Seiten derselben Medaille.

#### Mystische Sprachentstehung

Aber wie entsteht Sprache überhaupt? Und wie die einzelnen Sprachen? Seit alters her ranken sich um dieses Thema Mythen und Theorien. In der semitischen Welt erschafft Gott den Menschen im Paradies mit seiner Sprache, jedoch mit einem unvollständigen Wortschatz, denn – so steht es im ersten Buch Mose des Alten Testaments geschrieben – „da nun Gott, der Herr, von der Erde gebildet hatte alle Tiere des Feldes und alle Vögel unter dem Himmel, so führte er sie dem Menschen vor, zu sehen, wie er jedes nennen würde. Und alle belebten Wesen sollten den Namen behalten, den ihnen der Mensch beilegte“. Ähnlich wird bei den gnostischen Mandäern Adam in der Lichtwelt erschaffen, wie in folgender Aussage des mandäischen Erzählers Scheich Sälem Čoḥeylī überliefert ist: „Ehe ein Mensch vorhanden war, existierten Glanz, Licht und Ehre, und der Glaube erschien, nachdem man Adam geschaffen hat, und er zu reden anfang [...] Dann, auf Gottes Befehl hin, sollte man Adam, den ersten Mann, (aus der Lichtwelt) auf die Erde herabbringen.“ Die Entstehung mehrerer Sprachen wird in der Bibel der Überheblichkeit der Menschen zugeschrieben, die einen Turm bis in den Himmel bauen wollten. Durch die Verwirrung der Sprache beendete Gott den Bau des Turmes.

„Externe Faktoren wie Krieg und Vertreibung können den Untergang einer gefährdeten Sprache dramatisch beschleunigen.“

Die Sprachreflexion der Griechen und Römer kennt einen mythischen Sprachschöpfer, der die Wörter den Dingen in vollkommener Weise zugeordnet habe. Platon nennt ihn „Demiurg“ (Baumeister), „Varro rex“ (König). Wenn wir Nachgeborenen die Ratio der ursprünglichen Zuordnung nicht mehr erkennen, liege das an sprachwandelbedingten Trübungen, die es durch etymologische Spekulation zu durchdringen gelte, um die wahren Wortursprünge zurückzugewinnen. Die Autoren haben das Konzept des Sprachschöpfers wohl kaum wörtlich genommen; es soll eher die grundsätzliche Problematik veranschaulichen, die mit dem Blick auf den Anfang von Sprache verbunden ist: Die Wörter scheinen zu den Dingen, die sie bezeichnen, in einem Verhältnis der „Richtigkeit“ zu stehen, deren Quelle aber im Dunkeln liegt. Wir Sprecher dürfen die Zeichen unserer Sprache nicht eigenmächtig ändern, wenn wir einander verstehen wollen, und doch sehen wir sie sich wandeln. Ein autoritativer Sprachschöpfer muss also sein Werk in die Zeit gestellt haben. Der römische Dichter Lukrez, der im 1. Jahrhundert vor Christus lebte, unterläuft dieses Konstrukt allerdings mit einer rationalistischen Fundamentalkritik: Wie hätte ein Einzelner seine Erfindung bei allen anderen durchsetzen können? In welchem Medium hätte er ihnen Nutzen und Gebrauch der Sprache erklären sollen? Hätten die neu erfundenen Wörter den Sprachkundigen nicht wie bloße Geräusche vorkommen müssen?

#### Kontinuierlicher Wandel

Wie der Mensch zur Sprache gekommen ist, bleibt anthropologische Spekulation. Einzelne Sprachen entstehen aber immer aus anderen Sprachen und Dialekten, in der Regel durch Sprachwandel. Wie man sich das im Großen vorstellen könnte, hat 1872 der deutsche Philologe Johannes Schmidt so beschrieben: Man denke sich, auf einer schiefen Ebene angeordnet, eine Reihe untereinander kontinuierlich verständlicher Varietäten A bis X einer Sprache. Wenn nun zum Beispiel die Varietät F „durch politische, religiöse, sociale oder sonstige verhältnisse ein Übergewicht“ über seine Nachbarn C bis E und G bis K gewinne und sie verdränge, grenze F danach „auf der einen Seite unmittelbar an B, auf der anderen unmittelbar an L“. Damit sei „zwischen F und B einerseits, zwischen F und L andererseits eine scharfe Sprachgrenze gezogen, eine Stufe an die Stelle der schiefen Ebene getreten“.

Im Kleinen vollzieht sich dieser Prozess über Lautverschiebungen und Neuerungen in Morphologie, Syntax und Semantik, die zu unterschiedlichen, zunächst aber noch gegenseitig verständlichen Sprachen führen. Die Tochtersprachen des Vulgärlateinischen haben sich so aus einem Dialektkontinuum herausgebildet – anfangs, bis ins Mittelalter hinein, noch überdacht vom „klassischen“ Schriftstandard. Italienisch, Französisch, Spanisch und andere mehr wurden aber bald als regelrechte Sprachen empfunden und nicht mehr als „neulateinische Dialekte“

**„Es gibt wohl kaum eine sterbende Sprache, die keine Spuren in der sie verdrängenden Sprache hinterlässt.“**

# „Wie der Mensch zur Sprache gekommen ist, bleibt anthropologische Spekulation.“

bezeichnet (im Italienischen gibt es immerhin noch den Ausdruck „lingue neolatine“). Hingegen spricht man im Falle des Aramäischen bis heute von den „neuaramäischen Dialekten“, obwohl sie sich voneinander viel stärker unterscheiden als die romanischen Sprachen. Während im Neuwestaramäischen beispielsweise das alte Verbalsystem erhalten ist, haben die neuostaramäischen Dialekte aus den Partizipien ein neues System entwickelt. Hinzu kommen zahlreiche unterschiedliche Lautentwicklungen, die die Verständigung zwischen den Aramäern im Osten und Westen heute ganz unmöglich machen. Wäre das Aramäische nicht vom Arabischen verdrängt worden, hätte es wohl eine ähnliche Entwicklung genommen wie das Lateinische hin zu den romanischen Sprachen. Es wäre heute in mehreren nahöstlichen Ländern Staatssprache mit jeweils eigener Bezeichnung.

## Pidgins und Kreol

Einen ganz anderen Weg der Sprachentstehung nehmen sogenannte Pidgins und Kreolsprachen. Pidgins entstehen, wenn Sprecher verschiedener Sprachen eine Fremdsprache unvollkommen erlernen, um sich gegenseitig verständigen zu können. Das älteste bekannte Pidgin basiert auf dem Arabischen und wurde im elften Jahrhundert in Mauretania gesprochen. Auch das Deutsche hat auf Papua-Neuguinea und in Namibia Pidgins hervorgebracht, die heute aber alle vom Aussterben bedroht sind.

Aufschlussreich ist auch das Beispiel des Arabischen in Juba, der Hauptstadt des Südsudan. Für die Eroberung des Südsudan hatte die osmanisch-ägyptische Armee im 19. Jahrhundert Sprecher verschiedener sudanesischer Sprachen zwangsrekrutiert. Die Sprache des Befehlshabers war ein ägyptisch-arabischer Dialekt, auf dessen Basis nun das Pidgin entstand, mit dem die neuen Rekruten sich auf einfache Weise verständigen konnten. Es wird nach dem osmanischen Wort für „Offizier“ deshalb auch Bimbaschi-Arabisch genannt. Nach dem Ende des Feldzugs blieben die Soldaten in Juba und verständigten sich nicht nur weiterhin mit dem neu entstandenen Pidgin,

sondern brachten es auch den Frauen bei, die sie dort heirateten. Noch war diese Sprache ein Pidgin, das von niemandem als Muttersprache gesprochen wurde. Das änderte sich mit der nächsten Generation, die keine andere Sprache mehr beherrschte.

Sobald ein Pidgin zur Muttersprache geworden ist, wird es Kreol genannt und beginnt nun eine eigenständige Entwicklung. Die Theorie des niederländischen Sprachwissenschaftlers Cornelis Versteegh, dass die modernen arabischen Dialekte aus Pidgins entstanden seien, wird allerdings von den meisten Arabisten abgelehnt. Dagegen hält es der britische Linguist Bruce Ingham für möglich, „that Modern English sprang from such an interaction between dominant Romance-speaking Normans and subject Germanic-speaking Saxons in the early part of this millenium. Similarly, Modern Persian may have emerged in this way through the contact of a Persian subject population and an Arab ruling élite“.

## Wiederauferstehung von den Toten

Der Tod einer Sprache ist nicht das Ende ihrer Existenz. Deshalb kann man sie lernen, erforschen, zu bestimmten Zwecken benutzen und unter besonders günstigen Umständen sogar im vollen Sinne reanimieren. Die in der Welt der Sprachen bisher einzige erfolgreiche Wiederbelebung einer antiken Sprache, nämlich des Hebräischen, begann im 19. Jahrhundert, als einige jüdische Sprachwissenschaftler, besonders Eliezer Ben-Jehuda, die Einführung des Hebräischen als Umgangssprache „mindestens in den Jerusalemer Talmudschulen“ forderten. Diese Aufforderung wurde zwar begrüßt, aber als „frommer Wunsch“ betrachtet. Die Auswanderung Ben-Jehudas nach Palästina, seine konsequente Verwendung des Hebräischen in der eigenen Familie, die Veröffentlichung seines Gesamtwörterbuchs der hebräischen Sprache und die Tatsache, dass immer mehr Juden mit ganz unterschiedlichen Muttersprachen nach Palästina einwanderten, die sich nur auf Hebräisch verständigen konnten, führten dazu, dass die Forderung nach Wiedereinführung des Hebräischen



BIRTH, DEATH AND RESURRECTION

# THE LIFE CYCLE OF LANGUAGES

WERNER ARNOLD &amp; GERRIT KLOSS

Languages undergo constant change: new languages emerge while others die out. But how do these processes unfold? How is a language born? And from which point is a language considered dead? Heidelberg linguists are investigating the complex dynamics of stop and go, becoming and fading, that characterise language development.

Languages are not born from nothing; they always arise from other languages and dialects, usually through a process of language change. The derivative languages of Vulgar Latin, for instance, evolved from a dialect continuum. But soon they were regarded as proper languages, rather than ‘neo-Latin dialects’. Pidgin languages, on the other hand, take a very different route: They develop when speakers of different languages learn a foreign language imperfectly in order to be able to communicate with each other. Once a pidgin achieves the status of a native language, it is called a creole. By the way: The German language, too, has given rise to pidgins – in Papua New Guinea and Namibia – but these languages are today threatened by extinction.

So how do languages die? A language is considered dead if it is not passed on to the next generation – it dies along with its last speaker. This threat affects mainly languages with low prestige. But even prestigious languages may come under pressure: Aramaic erased all older languages in the Near East, only to be itself supplanted by Arabic. War and displacement can dramatically accelerate the demise of a threatened language. Frequently, however, extinct languages are not dead in every respect, but live on as substrate in another language. And the death of a language does not necessarily mean the end of its existence: We can still learn and investigate it and, under favourable circumstances, even bring it back to life. ●

PROF. DR WERNER ARNOLD has held the Chair of Semitic Studies at Heidelberg University's Department of Languages and Cultures of the Near East since October 1999. He began his academic career at Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) with a degree in Islamic studies, Semitic studies and applied linguistics. In 1985 he began a two-year research stay in the Aramaic villages of the Qalam n Mountains in Syria. After his return, he worked as a research assistant at the Chair of Semitic Studies of Heidelberg University, and later transferred to the Institute of Non-European Languages and Cultures at FAU. Prof. Arnold's research interests are Aramaic dialectology and Neo-Aramaic. He is editor of the 'Journal of Arabic Linguistics' and co-editor of the 'Mediterranean Language Review'.

Contact: werner.arnold@ori.uni-heidelberg.de

PROF. DR GERRIT KLOSS studied classical philology and general and comparative linguistics at the universities of Göttingen, Tübingen and Florence. Following his PhD and habilitation in Göttingen, he first worked in Cologne before transferring to Heidelberg University in 2002; a year later, he accepted the University's offer of Germany's first and only chair of classical philology with a focus on Latin and Greek linguistics. Prof. Kloss is particularly interested in the formal study of literary texts using such methods as language theory, grammar, metrics, rhetoric and textual criticism. His research comprises a wide range of genres, including comedy, epic, didactic poetry, epigram and historiography.

Contact: gerrit.kloss@skph.uni-heidelberg.de

**“Languages do not exist in an embryonic or infantile state; they are always mature by the time we study them.”**

immer mehr Anhänger fand. Es gab aber auch zahlreiche Gegner, die der Meinung waren, dass man „wissenschaftliche Disziplinen nicht in hebräischer Sprache lehren könne“.

Zum Kampf um die hebräische Sprache kam es in den Jahren 1913/14, als am Technikum (heute Technion) in Haifa das Deutsche als Unterrichtssprache beschlossen wurde. Proteste aus der gesamten jüdischen Welt führten schließlich dazu, dass der Beschluss revidiert wurde und bei der Gründung des Staates Israel die neue Staatssprache bereits Tausende von Muttersprachlern hatte. Die hebräische Sprache konnte sich auch deshalb durchsetzen, weil sie, „als sie längst aufgehört hatte, eine lebendige Sprache zu sein, eine ganze philosophische Literatur mit einer ungemein reichhaltigen Terminologie für alle Begriffe der älteren Philosophie“ (Ben-Jehuda) geschaffen hatte, und sich daher „auch allen Erfordernissen der modernen wissenschaftlichen Terminologie anpassen“ konnte. Zahlreiche Schulen und Kindergärten, in denen mit einer neuen Methode „Hebräisch in hebräischer Sprache“ (Ivrit b-Ivrit) gelehrt wurde, trugen sicher ebenso zum Erfolg bei. Doch der Siegeszug des Hebräischen hat auch eine Kehrseite: So wurden durch ihn zahlreiche Sprachen und Dialekte des Judentums verdrängt, darunter das traditionsreiche Ladino und viele jüdische Dialekte des Aramäischen.

Ein weiteres Beispiel für die versuchte Reanimation einer Sprache ist das Manx-Gälische, das ehemals auf der Isle of Man gesprochen wurde, bis es am 27. Dezember 1974 mit dem letzten verbliebenen Muttersprachler starb. Noch zu Lebzeiten der letzten Sprecher wurde es mit dem Ziel dokumentiert, es nach seinem absehbaren Tod zügig wiederzubeleben. So waren dieselben Sprachwissenschaftler, die die Sterbebegleiter des alten Manx gewesen waren, auch die Geburtshelfer des neuen. Sprachpflegerische Bemühungen, vor allem Unterricht in Kindergärten und Schulen, haben dazu geführt, dass heute wieder zwei Prozent der Bevölkerung der Isle of Man angeben, Kenntnisse des Manx zu haben, unter ihnen erste neue Muttersprachler. Kurioserweise erklärte die UNESCO Manx im Jahr 2009 dennoch für „extinct“. Viele Sprecher protestierten, eine Schulklassen schrieb: „If our language is extinct then what language are we writing in?“ Die UNESCO beugte sich der Evidenz und änderte den Status von Manx - in „critically endangered“. Die Wiederauferstehung von den Toten bedeutet eben für Sprachen, anders als für Menschen, nur ein vorläufiges Heilsversprechen. ●

**„Der Tod einer Sprache ist nicht das Ende ihrer Existenz. Deshalb kann man sie lernen, erforschen und unter besonders günstigen Umständen sogar reanimieren.“**

**J A**

**N E I N**

**V I E L L E I C H T ?**

JA, NEIN, VIELLEICHT?

# ZWISCHEN DEN STÜHLEN

SILKE HERTEL, INGRID SCHOBERTH &amp; GERHARD DANNECKER

**Darf ein schüchterner Schüler dafür gelobt werden, dass er sich gegen eine Gruppe mobbender Mitschüler zur Wehr setzt, auch wenn er dabei seine Fäuste nutzt? Und wie lässt sich das inklusive Schulkonzept befürworten, wenn gleichzeitig die Sorge mitschwingt, dieser Aufgabe im Schulalltag nicht gewachsen zu sein? Allzu oft sehen sich Lehrkräfte im Schulalltag mit komplexen Urteils- und Entscheidungsdilemmata konfrontiert. Heidelberger Wissenschaftler untersuchen am Beispiel des Lehrerberufs, welche Faktoren die Urteils- und Entscheidungsfindung beeinflussen und welche Fähigkeiten wir benötigen, um ihr gewachsen zu sein.**

# W

Wir kennen sie alle: Situationen, in denen wir uns mit einer Entscheidung schwertun, in denen wir nicht wissen, was richtig oder falsch ist, welchen Weg wir einschlagen oder ob wir ein Angebot annehmen oder ablehnen sollen – und das, obwohl wir jeden Tag eine Vielzahl von Entscheidungen treffen. Urteilen und Entscheiden sind zentrale Prozesse unseres Denkens, sie wirken sich auf unser Handeln aus, häufig auch auf unsere Zukunft und auf die unserer Mitmenschen. Ist eine Entscheidung einmal getroffen, gilt es, sie möglichst konsequent zu verfolgen. Manchmal kann es aber auch erforderlich sein, den eingeschlagenen Weg zu überdenken und eine Alternative zu wählen. Hierfür braucht es die Fähigkeit der Selbstregulation. Diese trägt dazu bei, dass wir unsere Gefühle, Gedanken und Handlungen auf ein gesetztes Ziel hin ausrichten können und dass wir in der Lage sind, unser Handeln im Prozess zu reflektieren und – falls erforderlich – anzupassen.

Worin bestehen Dilemmata beim Urteilen und Entscheiden? Und warum ist insbesondere die Selbstregulation in diesen Situationen so wichtig? Urteilen und Entscheiden sind Prozesse, die eng miteinander verbunden sind. Während beim Urteilen die Bewertung eines Objekts oder einer Person auf der Grundlage von spezifischen Merkmalen und Urteilsdimensionen erfolgt, wird beim Entscheiden die Wahl zwischen verschiedenen Alternativen getroffen, das heißt, ein Weg wird eingeschlagen und eine andere Option wird verworfen. Urteile im psychologischen Sinne gehen nicht zwingend mit Handlungen einher, im Gegensatz dazu folgt auf eine Entscheidung in der Regel auch eine Handlung.

Beide Prozesse, das Urteilen und das Entscheiden, sind stark von Heuristiken geprägt, das heißt, von vereinfachten Denkprozessen, mit deren Hilfe auch in komplexen Situationen schnelle Schlussfolgerungen möglich sind. Beispiele hierfür sind der Vergleich mit ähnlichen Situationen, in denen man schon einmal gewesen ist oder die aus Berichten bekannt sind – oder auch die Typisierung einer Situation aufgrund markanter Merkmale. Heuristiken stellen im Alltag eine hilfreiche Stütze dar, sie können aber bei unangemessener Anwendung auch zu fehlerhaften Urteilen oder Entscheidungen führen. Ein Urteil beziehungsweise eine Entscheidung zu treffen ist folglich immer auch

„Wir sind immer auf der Suche nach der einen, der richtigen Entscheidung.“

mit einer gewissen Unsicherheit verbunden – nicht zuletzt, da es nie möglich ist, alle Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen können, zu kennen. Der Versuch, alle diese Aspekte zu überblicken, kann letztlich sogar dazu führen, in eine Starre zu verfallen, keine Entscheidung mehr fällen zu können.

Urteils- und Entscheidungsdilemmata kennzeichnen sich dadurch, dass sowohl mit den präferierten Urteilen und Entscheidungen als auch mit den jeweiligen möglichen Alternativen gleichermaßen negative Konsequenzen verbunden sind. Auch die Erwartung gleichermaßen positiver Konsequenzen kann zu einem Dilemma führen. Die Schwierigkeit besteht nun darin, sich in einer nicht eindeutigen Situation ein Urteil zu bilden beziehungsweise eine Entscheidung zu treffen. Dies fällt uns deshalb so schwer, weil wir immer auf der Suche nach einem eindeutigen Urteil und der einen, der richtigen Entscheidung sind.

Selbstregulation nimmt bei Urteils- und Entscheidungsdilemmata einen besonderen Stellenwert ein: Nach der Entscheidung für ein Ziel sind Zielkonflikte auszuhalten. Emotionen, Gedanken und Handlungen sind auf das gewählte Ziel hin auszurichten. Die gewählte Handlung ist abzuschirmen gegen alternative Handlungsimpulse und das früher oder später einsetzende Grübeln – dies alles in einer Situation, in der man sich selbst nicht sicher ist, ob der gewählte Weg der richtige ist.

#### **Selbstregulation – das richtige Maß**

In den vergangenen Jahren hat die Forschung zur Selbstregulation deutlich zugenommen und wichtige Ergebnisse hervorgebracht. Dabei werden unterschiedlichste Bereiche des täglichen Lebens, zum Beispiel Ess- und Gesundheitsverhalten, Paarbeziehungen, Lernen in Schule und Hochschule sowie berufliche Kontexte, behandelt. Sich selbst regulieren zu können heißt, die eigenen Gedanken, Gefühle und Handlungen bewusst und zielgerichtet zu lenken. Allerdings ist das richtige Maß entscheidend: Ein überreguliertes Verhalten wie beispielsweise ein Kontrollzwang bei der Nahrungsaufnahme (Magersucht) ist genauso ungünstig wie ein wenig oder nicht reguliertes Verhalten, etwa Hyperaktivität bei ADHS (Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung). Eine gelungene Selbstregulation ist eine wichtige Voraussetzung für ein erfülltes, erfolgreiches und gesundes Leben – sowohl im privaten als auch im beruflichen Kontext.

Zur Veranschaulichung des Wirkprinzips der Selbstregulation eignet sich ein Vergleich mit einem Heizungsthermostat. Ausgangspunkt ist ein Soll- beziehungsweise Ziel-Zustand, der vorab definiert wird. Im Fall eines Thermostats ist dies die voreingestellte Temperatur. Der erste Schritt besteht aus der Erfassung des Ist-Zustands, als zweiter Schritt schließt sich die Prüfung an, ob und wenn ja wie weit der Ist-Zustand von dem gewünschten Ziel-

Zustand entfernt ist. Basierend auf diesem Ist-Soll-Vergleich werden Aktionen ausgewählt und ausgeführt: Ist die aktuelle Temperatur höher als die voreingestellte, springt die Heizung an; liegt der Ist-Wert über dem Soll-Wert, bleibt sie ausgeschaltet. Nach der Aktion erfolgt abermals ein Vergleich. Entsprechen sich Ist- und Soll-Zustand, braucht es keine weitere Aktivität: Die Heizung beendet den Heizvorgang. Ergibt die erneute Prüfung, dass der Soll-Zustand noch immer nicht erreicht ist, wird das Heizen fortgesetzt.

Die Entscheidung über „Stop“ oder „Go“ erfolgt hier auf der Basis eines einfachen Ist-Soll-Vergleichs. Dieses Prinzip findet sich auch in den Modellen der Selbst- beziehungsweise der Handlungsregulation des Menschen wieder. Dabei werden drei aufeinanderfolgende Phasen unterschieden: erstens die Planungsphase, in der wir die Situation erfassen und Ziele formulieren sowie Handlungen auswählen; zum Zweiten die Handlungsphase, in der Aktionen umgesetzt und hinsichtlich ihrer Umsetzungsqualität und Effektivität überprüft werden; sowie drittens die Reflexionsphase, in der wir die erzielten Ergebnisse mit dem vorher gesetzten Ziel vergleichen. Aus diesem Vergleich resultieren Emotionen wie Stolz, Frustration oder Freude und Erkenntnisse darüber, wie nützlich unsere Strategien waren und wie angemessen die gesetzten Ziele. Diese Erkenntnisse können Implikationen für die nächste Handlungsphase haben, indem sie die Auswahl der Strategien und die Formulierung der Ziele beeinflussen. Hier wird der zyklische Charakter der Handlungsregulation deutlich.

#### **Die Praxis: Entscheidungssituationen im Schulalltag**

Aber ist es wirklich so einfach? Füllen wir die Entscheidung über „Stop“ oder „Go“ tatsächlich nur auf der Grundlage eines einfachen Ist-Soll-Vergleichs? Was im Beispiel des Thermostats so plausibel klingt, erweist sich in der Alltagspraxis als ausgesprochen komplex – insbesondere, wenn wir vor einem Urteils- und Entscheidungsdilemma stehen. Um das menschliche Verhalten in derartigen Situationen näher zu beleuchten, befassen sich Heidelberger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Bildungswissenschaft, der Rechtswissenschaft, der Psychologie und der evangelischen Theologie in einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit Urteils- und Entscheidungsprozessen im Schulalltag. Das Projekt, das den Titel „Selbstregulation von Lehrkräften in Urteils- und Entscheidungsdilemmata-Situationen im Schulalltag“ trägt, wird mit einer Anschubfinanzierung im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert.

Der Schulalltag ist geprägt von einer Vielzahl unterschiedlichster Situationen, in denen Lehrkräfte schnell und kompetent urteilen, entscheiden und handeln müssen: Wie kann ein Streit zwischen Schülerinnen und Schülern in der Pause in Wohlgefallen aufgelöst werden? Wie können Eltern, die in der Pause plötzlich vor dem Lehrzimmer

stehen, wertschätzend auf einen anderen Termin vertröstet werden? Oder ist es doch besser, jetzt gleich mit ihnen zu sprechen? Wie sind die Leistungen einer Schülerin zu bewerten, die unter einer Lernbeeinträchtigung leidet – und wie die eines Schülers mit Migrationshintergrund, der gerade neu in die Klasse gekommen ist?

Neben Urteils- und Entscheidungskompetenz erfordern derartige Situationen in hohem Maße die Fähigkeit zur Selbstregulation. Dass der Berufsalltag von Lehrkräften mit besonderen Anforderungen in diesem Bereich einhergeht, zeigt auch ein Vergleich mit anderen Berufsgruppen: Das Niveau an Belastungen und Beanspruchungen im Lehrerberuf ist in der Spitzengruppe angesiedelt. Die hohe berufliche Belastung wird als eine Ursache dafür angesehen, dass viele Lehrkräfte aus gesundheitlichen Gründen vorzeitig pensioniert werden.

Doch aus welchen Faktoren resultieren die besonderen Anforderungen an die Selbstregulation im Lehrerberuf genau und wie hängen diese mit Entscheidungs- und Urteilsdilemmata zusammen? An diesen Fragen setzt unser Forschungsprojekt an: Unterschiedliche Anforderungssituationen im Schulalltag werden systematisch und aus interdisziplinärer Perspektive betrachtet. Die Bildungswissenschaft und die Psychologie (Prof. Dr. Silke Hertel) bringen Aspekte des professionellen Lehrerhandelns ein, die evangelische Theologie legt den Schwerpunkt auf die Durchdringung ethischer und moralischer Urteilsbildung (Prof. Dr. Ingrid Schoberth) und die Rechtswissenschaft thematisiert die institutionellen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen von Entscheidungen und Urteilen und bewertet die getroffenen Entscheidungen (Prof. Dr. Gerhard Dannecker).

#### Interdisziplinäre Forschung ganz nah am Geschehen

Den Ausgangspunkt des Forschungsprojekts bildeten reale, teilweise sehr prominente Fälle aus dem Schulalltag, unter anderem der deutschlandweit in den Medien diskutierte Fall „Henri“ – ein Schüler mit Down-Syndrom, bei dem der Wechsel auf eine weiterführende Schule anstand. Gemeinsam mit Studierenden wurden im Rahmen von forschungsorientierten Lehrveranstaltungen (gefördert durch das Programm „Willkommen in der Wissenschaft – Forschungsorientierte Lehrkonzepte“ der Universität Heidelberg) zentrale Aspekte der Urteils- und Entscheidungsfindung aus den Perspektiven der unterschiedlichen Disziplinen herausgearbeitet. Heuristiken für die Urteils- und Entscheidungsfindung, Urteils- und Entscheidungstendenzen sowie Fehler beim Urteilen und Entscheiden wurden diskutiert. Anhand von Leitthemen wie zum Beispiel „Professionelle Distanz und individuelle Involviertheit“ oder „Individualität und Beurteilung“ sowie an Fallbeispielen aus der Schul- und Rechtspraxis entfaltete sich ein interdisziplinärer Diskurs.



**PROF. DR. SILKE HERTEL** ist seit 2013 Professorin für personale Kompetenzen im schulischen Kontext am Institut für Bildungswissenschaft und am Psychologischen Institut der Universität Heidelberg. Nach dem Psychologiestudium und der Promotion an der Technischen Universität Darmstadt wechselte sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Projekt PISA 2009 an das Deutsche Institut für Internationale Pädagogische Forschung in Frankfurt am Main. Von 2009 bis 2013 war sie Juniorprofessorin für adaptive Lernumgebungen an der Frankfurter Goethe-Universität und im IDEa-Forschungszentrum Frankfurt. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Selbstregulation und selbstreguliertes Lernen, berufsbezogene Kompetenzen und Professionalisierung von Lehrkräften, Gestaltung von (adaptiven) Lernumgebungen in Familien und Bildungseinrichtungen sowie Zusammenarbeit von Familie und Schule.

Kontakt: hertel@  
ibw.uni-heidelberg.de



**PROF. DR. INGRID SCHOBERTH** wurde im Jahr 2003 auf eine Professur für Praktische Theologie mit Schwerpunkt Religionspädagogik an die Theologische Fakultät der Universität Heidelberg berufen. Nach der Promotion in Systematischer Theologie an der Universität Erlangen, einem Lehrvikariat bei der Evangelisch-Lutherischen Kirche in Bayern und der Übernahme in den Pfarrdienst folgte im Jahr 1997 die Habilitation in Erlangen. Anschließend übernahm die Theologin Lehrstuhlvertretungen in Bonn und Berlin und lehrte an der Bergischen Universität in Wuppertal. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in folgenden Bereichen: religiöse Gegenwartslage von Kindern und Jugendlichen, Religionspädagogik und Ästhetik, Religionspädagogik und Ethik/politische Ethik, Theologie in religiöser Bildung sowie „Was ist Praktische Theologie mitten in der ‚Postmoderne‘“?

Kontakt: ingrid.schoberth@  
pts.uni-heidelberg.de



**PROF. DR. GERHARD DANNECKER** folgte im Jahr 2007 einem Ruf der Universität Heidelberg auf die Professur für Strafrecht und Strafprozessrecht an der Juristischen Fakultät. Seit 2009 leitet er das Institut für deutsches, europäisches und internationales Strafrecht und Strafprozessrecht der Ruperto Carola; darüber hinaus gehört er dem Direktorium des Instituts für Deutsches, Europäisches und Internationales Medizinrecht, Gesundheitsrecht und Bioethik der Universitäten Heidelberg und Mannheim an. Die Forschungsschwerpunkte des Juristen liegen im Bereich des deutschen und europäischen Wirtschafts-, Steuer- und Unternehmensstrafrechts und des Medizinstrafrechts sowie im Bereich der Konstituierung der Person im Recht und der Selbstregulation.

Kontakt: dannecker@  
jurs.uni-heidelberg.de

Unsere mehrdimensionale Betrachtung zeigte deutlich: Lehrkräfte urteilen und entscheiden im Schulalltag in einem Spannungsfeld aus individuellen Einstellungen und Überzeugungen, gesellschaftlichen Erwartungen sowie institutionellen Vorgaben, Normen und Regeln. Aus dieser Vielfalt an Faktoren können sich Urteils- und Entscheidungsdilemmata entwickeln: Darf ein schüchterner Schüler dafür gelobt werden, dass er sich endlich gegen eine Gruppe von mobbenden Mitschülern zur Wehr gesetzt hat, wenn er dazu seine Fäuste genutzt hat? Inwieweit können und dürfen pädagogische, leistungsbezogene und institutionelle Argumente bei der Versetzung einer Schülerin in die nächste Jahrgangsstufe einbezogen werden? Darf oder muss ein Notfallmedikament in der Schule verabreicht werden? Wie lässt sich eine Befürwortung von inklusiven Beschulungskonzepten mit der Sorge vereinbaren, dieser Aufgabe im Schulalltag nicht gewachsen zu sein?

In den sich stellenden Dilemmata-Situationen dürfen die Lehrkräfte dabei nicht frei für sich entscheiden, da sie in einen rechtlichen Rahmen eingebunden sind und als Träger öffentlicher Gewalt insbesondere den Vorgaben des Schulrechts Rechnung zu tragen haben. Dabei gibt das Recht nicht nur vor, welche Kriterien zu berücksichtigen sind, sondern auch, welche Aspekte unberücksichtigt bleiben müssen, zum Beispiel weil sie zu einer unzulässigen Diskriminierung oder Ungleichbehandlung führen würden. Gerade wenn verschiedene Interessen mehrerer Personen gegeneinander abzuwägen sind, enthält das Recht bindende Vorgaben. Damit geht aber nicht selten eine Überforderung einher, zumal rechtliche Vorgaben und moralische Intuition häufig nicht übereinstimmen. Gleichwohl müssen Lehrkräfte entscheiden und ihre Entscheidung verantworten.

Wenn es zu unlösbaren Konflikten kommt, unterliegen die Lehrkräfte mit ihrem Verhalten der nachträglichen Kontrolle durch die Schulbehörde beziehungsweise des Verwaltungsgerichts. Bei der Beurteilung der Rechtmäßigkeit sind die Lehrkräfte, die Verwaltungsbehörde und das Gericht ihrerseits an Gesetz und Recht gebunden und dürfen die gesetzgeberischen Wertungen nicht durch eigene Bewertungen ersetzen. Dabei sind die gesetzlichen Vorgaben gerade bei Dilemmata oft keineswegs so eindeutig und klar, dass sie der Berufsträger sicher beurteilen kann. Und auch für den Richter, der seine Entscheidung an den gesetzlichen Vorgaben ausrichten muss, ist das Bild vom „Gesetzgeber als Herr“ und dem „Richter als Diener“, der nur zur Anwendung bringt, was im Gesetz bereits vorgegeben ist, schief. Die richterliche Gesetzesanwendung stellt vielmehr einen rechtsschöpferischen Akt dar, und die richterliche Entscheidung erfordert einen Verstehensprozess, der das Gesetz zum Fall hin und den Fall zum Gesetz hin „entwickelt“. Juristisches Entscheiden ist also nicht nur Befolgung von Normenwendungsregeln, sondern beruht in hohem Maße auf professionellen Routinen, auf habituellem

# „Wenn wir unser Ziel nicht kennen oder nicht festgelegt haben, können wir den Weg dorthin nicht finden.“

Handeln des erfahrenen Praktikers. Und auch dieses Handeln soll in unsere Untersuchung eingebunden und mit dem Entscheiden der Lehrkräfte verglichen werden.

Um Urteils- und Entscheidungssituationen im Schulalltag systematisch erfassen zu können, entwickelten wir zunächst ein Kategoriensystem, das sich an den zentralen Aufgabenbereichen von Lehrkräften orientiert. Dieses beinhaltet nach den Standards der Lehrerbildung der Kultusministerkonferenz die Bereiche „Beurteilen“, „Diagnostizieren und Beraten“, „Unterrichten“, „Erziehen“ sowie „Innovieren“. Zudem wurde der Aspekt „Medizinische Versorgung“ ergänzt, da dieser durch die Änderungen der Regelungen zur Notfallversorgung und zur Medikamentenverabreichung sowie durch inklusive Schulkonzepte an Bedeutung gewonnen hat. Diese sechs Bereiche bilden die Dimension der Handlungsfelder von Lehrpersonen im Schulalltag ab. Als zweite Dimension zogen wir die Ebenen, zwischen denen sich das Urteils- und Entscheidungsdilemma entfaltet, zur Kategorisierung heran. Dabei unterscheiden wir zwischen individueller, gesellschaftlicher sowie institutioneller beziehungsweise rechtlicher Ebene. Dilemmata können sich sowohl innerhalb einer Ebene als auch über zwei oder mehr Ebenen hinweg ergeben. Neben einer deskriptiven Zuordnung bietet diese Systematisierung auf den Dimensionen „Handlungsfelder“ und „Handlungsebenen“ auch Ansatzpunkte, um mögliche Schritte zur Auflösung der Dilemma-Situation zu reflektieren.

In einem Folgeprojekt sollen nun weitere Erkenntnisse über die Heuristiken von Lehrkräften in Urteils- und Entscheidungssituationen gewonnen werden. Grundlage sind dabei die Fallbeispiele sowie das erarbeitete Kate-



YES, NO, MAYBE?

# BETWEEN A ROCK AND A HARD PLACE

SILKE HERTEL &amp; INGRID SCHOBERTH &amp; GERHARD DANNECKER

Only too often, educators are confronted with complex judgement and decision-making dilemmas in their work. They operate between the conflicting priorities of individual attitudes and beliefs, social expectations and institutional guidelines, standards and rules. This presents a special challenge. Heidelberg researchers from the fields of education studies, law, psychology and Protestant theology use the teaching profession as a model to examine which factors influence our judgement and decision-making processes, and which skills we need to cope.

Reaching a judgement or decision is particularly difficult if the various alternatives present equally negative or positive consequences – this is what we mean by a judgement or decision-making dilemma. In such situations, self-regulation plays a crucial role: Once we have decided in favour of an option, we must endure target conflicts and gear our emotions, thoughts and actions towards the chosen objective. In taking action, we must ignore the impulse to pursue a different course and try to avoid brooding thoughts, which usually set in sooner or later. The Heidelberg scientists show that decisions about ‘Stop’ and ‘Go’ in human actions are based on a complex system of judgements, assessments, motives, beliefs, attitudes and expectations. The pressure is alleviated somewhat by the fact that in most situations, there is not just one right decision – so even a ‘good enough’ decision may be regarded as a good choice. ●

PROF. DR SILKE HERTEL joined Heidelberg University in 2013 as Professor of Personal Skills in Education at the Institute for Education Studies and the Institute of Psychology. After completing her psychology studies and earning her PhD at TU Darmstadt, she worked as a research assistant in the PISA 2009 project, transferring to the German Institute for International Educational Research in Frankfurt/Main in 2009. From 2009 to 2013 she was Junior Professor of Adaptive Learning Environments at Goethe University Frankfurt and at the IDEa research centre in Frankfurt. Her research interests are self-regulation and self-regulated learning, professional competences and the professionalisation of teachers, design of (adaptive) learning environments in families and educational institutions and cooperation between families and schools.

Contact: hertel@  
ibw.uni-heidelberg.de

PROF. DR INGRID SCHOBERTH accepted the Chair of Practical Theology with special focus on religious education at Heidelberg University's Faculty of Theology in 2003. She obtained her PhD in systematic theology from the University of Erlangen and went on to train as a minister with the Lutheran Church in Bavaria. Following her acceptance into the ministry, she completed her habilitation in Erlangen in 1997. She worked as an interim professor in Bonn and Berlin and taught at the University of Wuppertal. Prof. Schobert's research covers a number of fields: the current religious situation of children and adolescents, religious education and aesthetics, religious education and ethics/political ethics, theology in religious education and the question 'What is practical theology in post-modern times?'

Contact: ingrid.schobert@  
pts.uni-heidelberg.de

**“Decisions about  
‘Stop’ and ‘Go’  
in human actions  
are based on a  
complex system of  
judgements, as-  
sessments, motives,  
beliefs, attitudes  
and expectations.”**

PROF. DR GERHARD DANNECKER has held the Chair of Criminal Law and Criminal Procedure Law at Heidelberg University's Faculty of Law since 2007. He became head of the University's Institute for German, European and International Criminal Law and Criminal Procedure Law in 2009 and is a board member of the Institute for German, European and International Medical Law, Public Health Law and Bioethics of Heidelberg University and the University of Mannheim. Prof. Dannecker's research interests include German and European commercial, tax and business criminal law and medical criminal law, the constitution of a person under the law, and self-regulation.

Contact: dannecker@  
jurs.uni-heidelberg.de

# „Über ‚Stop‘ oder ‚Go‘ im menschlichen Handeln entscheidet ein komplexes Zusammenspiel aus Urteilen, Einschätzungen, Motiven, Überzeugungen, Haltungen und Erwartungen.“

goriensystem. (Angehende) Lehrkräfte werden gebeten, die Fälle in dem Kategoriensystem einzuordnen und ihre Lösungsansätze für die Urteils- oder Entscheidungs-dilemma-Situation darzustellen. Im Mittelpunkt stehen folgende Forschungsfragen: Wann setzen Lehrkräfte in ihrem Urteilen und Entscheiden Heuristiken ein und welche wählen sie? Gibt es hierbei Unterschiede zwischen Berufseinsteigern und erfahrenen Lehrkräften? Wann sind die Heuristiken hilfreich und wann führen sie zu fehlerhaften Einschätzungen der Situation? Und welche konkreten Strategien der Selbstregulation wenden Lehrkräfte dabei an? Aus den Befunden wollen wir konkrete Implikationen für die Aus- und Weiterbildung von Lehrkräften sowie für die Beratung und die Supervision von (angehenden) Lehrkräften ableiten.

## „Stop“ oder „Go“: Ist es wirklich so einfach?

Eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren eines Regelkreises ist der Soll-Wert. Liegt dieser nicht vor, kann keine Aktion erfolgen. Gleiches gilt auch für unser Handeln: Wenn wir unser Ziel nicht kennen oder nicht festgelegt haben, können wir den Weg dorthin nicht finden. Urteils- und Entscheidungsdilemmata liegen oft darin begründet, dass unterschiedliche Aspekte auf den Soll-Wert beziehungsweise auf die Zielsetzung einwirken und dadurch ein Spannungsfeld entstehen kann. Entlastend wirkt hier,

dass es in den meisten Situationen nicht die eine richtige Entscheidung gibt – eine Entscheidung, die gut genug ist, kann dementsprechend auch als eine gute Wahl betrachtet werden.

Neben der Bestimmung des Soll-Wertes kommt der Beurteilung der Ist-Situation ein wichtiger Stellenwert zu: Erscheint das Ergebnis bereits durch die Situation festgelegt, wird höchstwahrscheinlich keine Handlung erfolgen. Allerdings führt allein die Einschätzung, dass eine Situation ergebnisoffen ist, nicht automatisch zu einer Handlung. Urteile und Einschätzungen dahingehend, ob das erwünschte Ergebnis selbst herbeigeführt werden kann, ob dieses Ergebnis und die daraus resultierenden Folgen für die Person wichtig genug sind und ob das Ergebnis diese Folgen auch wirklich nach sich zieht, beeinflussen maßgeblich, ob eine Handlung erfolgt oder nicht.

Hier wird deutlich: Die Metapher des Regelkreises ist etwas zu kurz gegriffen. Über „Stop“ oder „Go“ im menschlichen Handeln entscheidet nicht nur ein einfacher Ist-Soll-Vergleich, sondern ein komplexes Zusammenspiel aus Urteilen, Einschätzungen, Motiven, Überzeugungen, Haltungen und Erwartungen. Der Schlüssel, das eigene Urteils- und Entscheidungsverhalten sowie das eigene Handeln besser zu verstehen, liegt in der Reflexion. ●

**WIE  
LANGE**

**NOCH?**

WIE LANGE NOCH?

# AM ENDE DES LEBENS

ANDREAS KRUSE

**Jedes Leben muss irgendwann zu Ende gehen – auch wenn wir dies zeitweise nicht wahrhaben wollen. Wie aber lässt sich das Lebensende gestalten, welche Unterstützung ist in dieser Phase geboten und inwieweit sollte die Entscheidung, das eigene Leben vorzeitig abubrechen, Teil eines selbstbestimmten Daseins sein?**

„Ich lotse dich hinter die Welt,  
da bist du bei dir, unbeirrbar,  
heiter  
vermessen die Stare den Tod,  
das Schilf winkt dem Stein ab,  
du hast  
alles  
für heut Abend.“

Dieser Vers, der sich 1970 im Nachlass des Lyrikers Paul Celan (1920–1970) fand, soll dazu dienen, auf ein psychologisches und existenzielles Merkmal hinzuweisen, das im Prozess des Sterbens auch sichtbar werden kann: Im Falle einer gelingenden Schmerzlinderung wie auch einer erfolgreichen Kontrolle körperlicher und psychischer Symptome (Angst, Depression, Halluzinationen und Wahnbildungen) kann es gelingen, das Individuum darin zu unterstützen, sich auf das eigene Sterben einzustellen, das eigene Sterben – wenigstens in Ansätzen – mitzugestalten. Das psychologische Merkmal, das hier angesprochen ist, lässt sich mit dem Begriff der Selbstregulation umschreiben: Die sterbende Person versucht – dies mithilfe palliativmedizinischer und -pflegerischer wie auch mithilfe psychologischer, seelsorgerischer und sozialer Unterstützung –, die eigenen Gefühle und Gedanken zu kontrollieren, Phasen der Nähe und Distanz zu den wichtigsten Bezugspersonen zu definieren, schließlich zu artikulieren, wann sie von wem welche Hilfen erwartet. Das existenzielle Merkmal, das hier angesprochen ist, betrifft vor allem die innere Auseinander-

setzung mit dem Leben als Ganzem, einen in Ansätzen vorgenommenen Lebensrückblick, schließlich Sinnerfahrung und Stimmigkeitserleben im Austausch mit anderen Menschen.

## Das Sterben zulassen

Ich hatte die Möglichkeit, mehrere Studien zu leiten, die sich mit der Frage beschäftigten, wie die medizinisch-pflegerische Versorgung sterbender Menschen weiter verbessert werden kann. In einer dieser Studien stand die hausärztlich-familienmedizinische Versorgung von Tumorpatienten im Zentrum, die auf eigenen Wunsch und nach ausführlicher ärztlicher Konsultation („informed consent“) aus der Klinik in die hausärztliche Versorgung zurücküberwiesen wurden und zu Hause sterben konnten. In dieser Studie, die auch als Modellprojekt zur Implementierung eines ambulanten palliativmedizinischen Versorgungsangebotes diente, war die schmerztherapeutische wie auch die umfassende hausärztliche und palliativpflegerische Versorgung gesichert. Zudem konnten wir den Patientinnen und Patienten wie auch ihren Angehörigen psychologische und seelsorgerische Angebote unterbreiten. Hier habe ich gelernt, dass die Forderung durchaus gerechtfertigt ist, den Sterbensprozess zuzulassen, diesen nicht künstlich zu beenden, indem man vorschnell auf eine passive Sterbehilfe, also den Abbruch lebensverlängernder Maßnahmen, drängt. Dieser Deutung des Sterbens liegt ja auch die Annahme zugrunde, dass das Sterben zum Leben gehört, dass das Sterben also nicht von vornherein als ein unnatürlicher, als ein inferiorer Teil des Lebens zu verstehen ist, den man durch äußere Intervention frühzeitig abbrechen sollte.

Dabei muss genau geklärt werden, inwieweit das Individuum einen Grad an Widerstandsfähigkeit und Lebensbindung zeigt, der dafür spricht, das Sterben geschehen zu lassen. Dies heißt für die Palliativmedizin und Palliativpflege: die eigenen Maßnahmen ganz in den Dienst der sterbenden Person und deren Konzentration auf den Sterbeprozess zu stellen. In einer umfassend gestalteten Begleitung des Sterbenden kann es durchaus gelingen, dass dieser – wie es Paul Celan ausdrückte – „hinter die Welt gelotst“ wird, also noch Dinge erlebt und erfährt, die ihm vorher so nicht erlebbar und erfahrbar gewesen sind. Die Aussage Celans sollte dabei auch in umgekehrter Richtung verstanden werden: Jene, die einen Sterbenden begleiten, erleben und erfahren vielleicht Dinge, die sie in dieser Weise zuvor noch nicht erlebt und erfahren haben. „Pathemata paideumata genesetai tois allois“ – „Meine Leiden, so schwer sie sind, sind auch Lehren für den anderen“, so lesen wir bereits bei Dionysios von Halikarnassos, einem griechischen Geschichtsschreiber, der in der zweiten Hälfte des 1. Jahrhunderts vor Christus lebte. Damit wäre – in der Terminologie dieser Ausgabe des Forschungsmagazins gesprochen – das „Go“ umschrieben: Greife nur schmerz-



**PROF. DR. DR. H.C. ANDREAS KRUSE** ist seit 1997 Direktor des Heidelberger Instituts für Gerontologie. Er ist Mitglied in zentralen nationalen und internationalen politischen Gremien und leitet seit dem Jahr 2003 die Altenberichtscommission der Bundesregierung. Von 1999 bis 2002 war er Mitglied des 15-köpfigen UN-Expertenkomitees zur Erstellung des Weltaltensplans und von 2011 bis 2014 koordinierte er die Zukunftskommission von Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel. Seit 2016 ist er Mitglied und einer der stellvertretenden Vorsitzenden des Deutschen Ethikrates. Für seine wissenschaftlichen Verdienste erhielt Andreas Kruse zahlreiche Auszeichnungen, darunter den Presidential Award der International Association of Gerontology. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Rehabilitation und Palliativpflege, Lebensqualität bei Demenz, Potenziale des Alters, Verletzlichkeit im Alter sowie ethische und politische Fragen des Alters.

Kontakt: andreas.kruse@  
gero.uni-heidelberg.de

lindernd und symptomkontrollierend in den Prozess ein, unterbreche und verkürze diesen aber nicht.

### **Bewusst Abschied nehmen**

**„Ich bin viel krank.  
Ich lieg viel wach.  
Ich hab viel Furcht.  
Ich denk viel nach:  
Tu nur viel klug!  
Bringt nicht viel ein.  
Warst einst viel groß.  
Bist jetzt viel klein.  
War einst viel klein.  
Ist jetzt viel Not.  
Bist jetzt viel schwach.  
Wirst bald viel tot.“**

In diesem Gedicht des Schriftstellers und Satirikers Robert Gernhardt (1937–2006) spiegelt sich eine andere Einstellung zu Sterben und Tod wider. Dieses mit „Von viel zu viel“ überschriebene Gedicht hat Robert Gernhardt verfasst, als er wusste, dass er sterben würde. Wie hat es Dieter Hildebrandt in einem in „DIE ZEIT“ veröffentlichten Nachruf ausgedrückt? „Zuletzt hat Robert Gernhardt wie besessen gegen den Tod angedichtet.“ Dieses Gedicht zentriert sich um die Verletzlichkeit („Bist jetzt viel schwach.“), um die Furcht vor Sterben und Tod („Ich hab viel Furcht.“), um das Erleben deutlich reduzierter und immer weiter zurückgehender Möglichkeiten der Selbst- und Weltgestaltung („Warst einst viel groß. Bist jetzt viel klein.“).

In solchen Situationen werden Angehörige des palliativen Behandlungsteams nicht selten mit der Frage konfrontiert, welche Möglichkeiten der „Lebensverkürzung“ sich böten, da Sterben und Tod „unendlich viel Angst und Schrecken verbreiten“ (so drückte dies ein Teilnehmer in der von mir geleiteten Studie zur hausärztlichen Sterbebegleitung aus). Es ist mit Blick auf „Stop & Go“ wichtig, zu verstehen, dass der Sterbeprozess häufig auch mit Untergangserfahrungen und Zerstörungsängsten assoziiert ist, die das Leben aus subjektiver Perspektive fast unerträglich machen. In derartigen Situationen wird nicht selten die Forderung nach (ärztlich) assistiertem Suizid, aber auch nach Lebensverkürzung (aktive Sterbehilfe) laut, wobei diese Forderung auch Ausdruck der „Angst vor der Angst“ ist.

In solchen Situationen sollten zum einen Möglichkeiten einer hochgradig individualisierten Psychopharmaka-Therapie erwogen werden, die angst- und erregungslindernd wirken kann, zum anderen sollte die – im Kern stark ausgeprägte – Lebensbindung thematisiert werden, die ja mit dazu beiträgt, dass mit Sterben und Tod gedanklich wie emotional Untergang und Zerstörung verbunden werden: Die bevorstehende Auflösung der (irdischen) Existenz, mithin die Trennung vom Leben, wird vor allem dann für einen

Menschen zur Qual, wenn er in vielerlei Hinsicht an das Leben gebunden ist. Und schließlich bietet sich das fachlich und ethisch fundierte Gespräch darüber an, was medizinisch-pflegerisch, psychologisch, seelsorgerisch, sozial getan werden kann, um das Individuum davor zu schützen, qualvoll zu sterben, im Sterben „zerstört“ zu werden.

In der Fachwelt wurde die Methode des „Advance Care Planning“ entwickelt, um mit dem Patienten den möglichen weiteren Krankheitsverlauf wie auch die sich bietenden Möglichkeiten (und Grenzen) medizinischer und pflegerischer Intervention zu erörtern und diesem Gelegenheit zu geben, sich für eine bestimmte Behandlungsoption zu entscheiden. Wir sind derzeit in einem Projekt zur Palliativpflege mit der Frage befasst, wie die Methode des „Advance Care Planning“ weiter verfeinert werden kann, damit dem Patientenwillen noch größeres Gewicht im Kontext der medizinisch-pflegerischen Betreuung gegeben werden kann. Hier machen wir uns auch für die potenzielle Lebensbindung stark: Es geht darum, im Gespräch mit dem Patienten zu erkunden, welche Möglichkeiten der Selbst- und Weltgestaltung dieser erblickt, und zuzusichern, dass alles dafür getan wird,

### **Institut für Gerontologie**

Das Institut für Gerontologie (IfG) wurde 1986 an der Universität Heidelberg gegründet, um die interdisziplinäre Altersforschung zu intensivieren und ihre Erkenntnisse für die gerontologische Praxis fruchtbar zu machen. Zu den Forschungsschwerpunkten der aus unterschiedlichen Disziplinen stammenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am IfG gehören die Leistungsfähigkeit älterer Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer, gesellschaftliche Altersbilder im internationalen Vergleich, ethische und politische Fragen des Alters, weiterhin seelisch-geistige Entwicklungsprozesse und Kompetenz im hohen und sehr hohen Alter, die Bewältigung von Anforderungen, Belastungen und Grenzsituationen in diesem Lebensabschnitt, die rehabilitative und palliative Pflege schwer kranker und sterbender Menschen und schließlich die Förderung der Lebensqualität demenzkranker Menschen. Das Institut bezieht seine Fördermittel von der Europäischen Union, der Deutschen Forschungsgemeinschaft, von verschiedenen Bundesministerien sowie von der Robert Bosch Stiftung, der VolkswagenStiftung, der Körber-Stiftung und der Dietmar Hopp Stiftung. Es pflegt enge wissenschaftliche Kontakte mit gerontologischen Instituten in zahlreichen Ländern der Welt, darunter auch in den osteuropäischen Staaten und in Japan. Leiter des Instituts ist seit 1997 Prof. Dr. Andreas Kruse.

[www.gero.uni-heidelberg.de](http://www.gero.uni-heidelberg.de)

# „Meine Leiden, so schwer sie sind, sind auch Lehren für den anderen.“

Dionysios von Halikarnassos

diese Möglichkeiten zu verwirklichen – auf dass allmählich, in kleineren Schritten Abschied von Liebgewonnenem genommen werden kann, und zwar ein bewusst angenommener Abschied.

Gerade hier zeigt sich noch einmal die große Bedeutung einer begleitenden, tröstenden, zugleich ermutigenden Konzeption von Palliativmedizin, Palliativpflege, Hospizarbeit. Folgender auf Cicely Saunders (1918–2005), eine der Begründerinnen der Palliativmedizin und Hospizhilfe, zurückgehender Satz umschreibt dieses Konzept sehr gut: „Wir werden nicht nur alles dafür tun, damit Du in Würde sterben kannst, sondern damit Du in Würde leben kannst, bis Du stirbst.“ „Stop & Go“ – auch hier möchte ich feststellen: ein „Go“, das immer ein umfassend begleitetes „Go“ ist.

## **Auf lebensverlängernde Maßnahmen verzichten**

**„... aber für jeden Menschen ist sein Tod ein Unfall und, selbst wenn er sich seiner bewusst ist und sich mit ihm abfindet, ein unverschuldeter Gewaltakt.“**

Diese Zeilen finden sich in dem von der französischen Soziologin Simone de Beauvoir im Jahre 1968 verfassten Buch „Ein sanfter Tod“, in dem sich de Beauvoir ausführlich mit dem Sterben ihrer Mutter auseinandersetzt. „Gewaltakt“ – mit diesem Begriff trifft die Autorin die Empfindung nicht weniger Sterbender und ihrer Angehörigen, auch nicht weniger Mediziner, Pflegefachpersonen, Psychologen und Seelsorger, die über umfangreiche Erfahrungen in der Sterbebegleitung verfügen. Es sind nicht allein die Schmerzen, die einen das Sterben als Gewaltakt erleben lassen;

hier ist ja auch zu bedenken, dass sich die Schmerztherapie in einer Weise fortentwickelt hat (sowohl was die Zielgenauigkeit der Analgetika als auch deren Verabreichungsmodus betrifft), dass den meisten Sterbenden Schmerzen genommen oder aber die Schmerzen substanzial gelindert werden können. Es sind die zahlreichen Körpersymptome – bis hin zum Geruch –, die zu dem Empfinden beitragen, dass das Sterben nur noch ein Gewaltakt ist. „Stop“?

Hier nun gewinnt die passive Sterbehilfe zunehmend an Bedeutung: Wenn Patienten in einer Patientenverfügung erklärt haben, dass im Falle der zum Tode führenden, mit nicht zu lindernden Qualen verbundenen Krankheit das Leben nicht mehr verlängert werden soll, dann muss das Behandlungsteam den Mut haben, lebensverlängernde Maßnahmen zu beenden. Und auch in jenen Fällen, in denen Patienten an so starken Schmerzen leiden, dass eine hochpotente Schmerzmittelgabe notwendig wird, fällt die ihrerseits zum Tode führen kann (der allerdings nur als Folge in Kauf genommen und nicht beabsichtigt wurde), muss das Behandlungsteam den Mut zur Applikation dieser Schmerzmittel (in der gebotenen Dosis) haben.

Dabei sollte man allerdings auch bedenken: Einem palliativmedizinischen Team fällt die passive Sterbehilfe, fällt die indirekte Sterbehilfe bei Weitem nicht so leicht, wie dies in der öffentlichen Diskussion implizit angenommen und behauptet wird. Nicht selten wird so getan, als wäre die passive Sterbehilfe fachlich und auch ethisch völlig unbedenklich. Immer und immer wieder wird betont, dass die passive Sterbehilfe keine ethischen, keine persönlichen

**„Die Forderung nach Lebensverkürzung ist auch Ausdruck der ‚Angst vor der Angst‘.“**

# „Es sollte alles dafür getan werden, dass die Todeswünsche gelindert werden, dass an deren Stelle der Lebens- wille treten kann.“

Probleme aufwerfe, sondern nur die aktive Sterbehilfe. Und doch: Die Entscheidung, auf lebensverlängernde Maßnahmen zu verzichten, mithin das Potenzial der medizinischen Versorgung zur Lebensverlängerung nicht mehr zu nutzen, ist vielfach mit einem langen, auch konflikthaften Prozess der Selbstreflexion des für die Behandlung verantwortlichen Teams verbunden. Problematisch ist, wenn diese Reflexion nicht stattfindet, nicht stattfinden kann – sei es, weil die Zeit für eine solche Reflexion nicht gegeben ist, sei es, dass auch ökonomische Überlegungen dazu führen, auf lebensverlängernde Maßnahmen zu verzichten.

## Den Suizid assistieren

**„Wenn mir die Last der Schmerzen, des Elends und der Verachtung unerträglich wird, warum will man mich hindern, meinem Leiden ein Ende zu machen, und mich grausam eines Heilmittels berauben, das ich in den Händen habe?“**

Das fragt Charles de Secondat, Baron de la Brède et de Montesquieu (1689–1755). Er berührt damit die Frage des (ärztlich) assistierten Suizids. Am 6. November 2015 hat der Deutsche Bundestag mit großer Mehrheit ein Gesetz beschlossen, demzufolge die Beihilfe zur Selbsttötung (assistierter Suizid) in der Bundesrepublik Deutschland nur dann straffrei ist, wenn der Suizident seinen Tod selbst

herbeiführt und der Suizidhelfer „nicht geschäftsmäßig“ handelt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der ärztlich assistierte Suizid nicht unter Strafe steht, allerdings unter der Einschränkung, dass keine Geschäftsmäßigkeit besteht. Die Operationalisierung von Geschäftsmäßigkeit ist jedoch offen, was auch zur Kritik an diesem Gesetz geführt hat. Zu bedenken ist, dass – in Abhängigkeit von der jeweiligen Landesärztekammer – das Landesrecht Ärztinnen und Ärzten Suizidassistenz verbietet. Die Diskussionen, die der Referentenentwurf und schließlich das verabschiedete Gesetz innerhalb der Ärzteschaft ausgelöst haben, waren und sind enorm. Viele Ärzte argumentieren, dass dieses Gesetz im Konflikt mit dem ärztlichen Anspruch auf Lebenserhaltung stehe. Andere hingegen argumentieren, dass es die Selbstbestimmung des Patienten unterstreiche, die auch von dem Arzt ausdrücklich zu achten und zur Verwirklichung zu bringen sei.

Meine Frage lautet: Kann man den ärztlich assistierten Suizid tatsächlich gesetzlich regeln? Ist die Operationalisierung der Geschäftsmäßigkeit überhaupt zu leisten? Verunsichert ein derartiges Gesetz nicht die Beziehung zwischen Arzt und Patient? Wäre es nicht besser, die Versorgung – und zwar die medizinisch-pflegerische ebenso wie die psychologische, spirituelle und soziale – schwer kranker und sterbender Menschen so zu fördern (und die Versorgungsstrukturen entsprechend auszubauen), dass ein derartiges Gesetz erst gar nicht notwendig ist? Der entsprechende Aufruf von Kolleginnen und mir hat in der (medialen) Öffentlichkeit breite Resonanz gefunden. Auch hier ergibt sich: Es sollte alles dafür getan werden, dass die Todeswünsche der Person gelindert werden, dass an deren Stelle der Lebenswille treten kann.

Dabei hat mir die vor mehreren Jahren mit Kollegen der Mannheimer Medizinischen Fakultät durchgeführte Forschung zu den Todeswünschen schwer kranker und sterbender Menschen gezeigt, wie volatil die geäußerten Todeswünsche vielfach sind: Sie fluktuieren erheblich, und zwar in Abhängigkeit vom Grad erlebter sozialer Teilhabe, erlebter emotionaler Intimität in den sozialen Beziehungen und erlebter Bereitschaft der Angehörigen und Freunde, die bestehende Situation aktiv mitzutragen. Hinzu kamen Einstellung und Haltung des Behandlungsteams: Inwieweit hat dieses die Patienten ausführlich und mitfühlend über die mögliche Krankheitsentwicklung und die möglichen Interventionsstrategien informiert? Inwieweit hat dieses die Patienten überzeugen können, dass in ihrem Falle noch Möglichkeiten der Selbst- und Weltgestaltung gegeben seien und dass alles dafür getan werde, bei der Verwirklichung dieser Möglichkeiten zu helfen? Die Frage des „Stop & Go“ beantwortet sich somit auch vor dem Hintergrund der sozialen Teilhabe von Patienten wie auch der fachlichen und ethischen Kompetenz innerhalb des Behandlungsteams. ●



HOW MUCH LONGER?

# AT THE END OF LIFE

ANDREAS KRUSE

Dying is a part of life – even if we would rather not acknowledge this fact at times. But how can we shape the final stage of life, what kind of support do we need in this phase, and to what extent should the decision to end one’s own life be part of a self-determined existence? Every one of us is characterised by an individual combination of attitudes, experiences and knowledge. These remain with us until we die – and they form the background against which we can formulate various intervention strategies relating to end-of-life care. There are four basic strategies: comprehensive end-of-life care; ‘advance care planning’, in which patients receive detailed information on the course of their disease and on the possibilities (and limits) of medical and care interventions, allowing them to choose a treatment option for themselves; passive euthanasia; and finally (doctor-) assisted suicide.

With regard to passive euthanasia, the article illustrates that this option requires extensive discussion and deliberation, not just on the part of the patient, but also on the part of the treatment team. The decision to eschew life-extending measures is frequently accompanied by a long and difficult process of self-reflection for those responsible. As concerns assisted suicide, the article points out that the corresponding legal regulation poses a number of problems. Instead of laws governing assisted suicide, we should establish general infrastructural conditions that allow for truly comprehensive end-of-life care. We should do everything in our power to ease a patient’s death wish so that it may be replaced with the will to live. ●

**PROF. DR DR H.C. ANDREAS KRUSE** has headed the Heidelberg Institute of Gerontology since 1997. He is a member of central national and international political committees and has served as chairman of the German government's Expert Commission for the German National Report on the Situation of Older People since 2003. Between 1999 and 2002 he belonged to a UN commission of 15 experts charged with drawing up the International Plan on Ageing, and from 2011 to 2014 he coordinated the Commission for the Future of Chancellor Dr Angela Merkel. In 2016 he joined the German Ethics Council as one of the council's vice chairs. Andreas Kruse has received numerous awards for his scientific work, among them the Presidential Award of the International Association of Gerontology. His research interests include rehabilitation and palliative care, the life quality of dementia patients, the potential of old age, vulnerability in old age, and ethical and political issues of old age.

Contact: [andreas.kruse@gero.uni-heidelberg.de](mailto:andreas.kruse@gero.uni-heidelberg.de)

**“Dying is a part of life. It is nothing unnatural or inferior that should be terminated prematurely through external intervention.”**



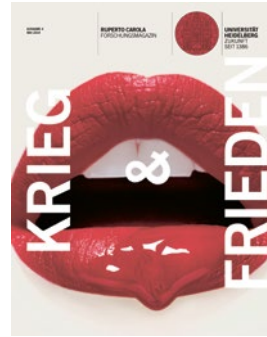
ALT & JUNG  
AUSGABE 1  
OKTOBER 2012



HIMMEL & HÖLLE  
AUSGABE 2  
APRIL 2013



ORDNUNG & CHAOS  
AUSGABE 3  
NOVEMBER 2013



KRIEG & FRIEDEN  
AUSGABE 4  
MAI 2014



DRAUSSEN & DRINNEN  
AUSGABE 5  
NOVEMBER 2014



GESUND & KRANK  
AUSGABE 6  
JUNI 2015



SCHATTEN & LICHT  
AUSGABE 7  
DEZEMBER 2015



NORD & SÜD  
AUSGABE 8  
JULI 2016



STOP & GO  
AUSGABE 9  
DEZEMBER 2016