

Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft 6
XLAB Science Festival

Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft 6

XLAB Science Festival

*Herausgegeben von
Eva-Maria Neher*



WALLSTEIN VERLAG

Inhalt

EVA-MARIA NEHER	
Vorwort	7
JEAN-MARIE LEHN (Nobelpreis 1987)	
Supramolekulare Chemie – Moleküle, Übermoleküle und molekulare Funktionseinheiten	15
WALTER STEURER	
Quasikristalle und verbotene Symmetrien	81
KLAUS MÜLLEN, MARTIN BAUMGARTEN UND RANDOLF SCHÜCKE	
Polymerelektronik Organische Halbleiter für Alltags- und Hightechanwendungen	91
JANINA ZIMMERMANN	
Oxidation – Verderb oder Schutz	103
MARINA V. RODNINA UND WOLFGANG WINTERMEYER	
Genauigkeit und Geschwindigkeit der Proteinsynthese	113
ARNULF QUADT	
Dem Higgs-Boson auf der Spur Aktuelle Ergebnisse am <i>Large Hadron Collider</i>	123
JÜRGEN TAUTZ	
Superorganismus Bienenstaat Der Bien – ein Säugetier mit vielen Körpern	133
STEFAN RAHMSTORF	
Die Klimakrise	151

INHALT

GERHARD GOTTSCHALK

EHEC –

Wenn mikrobielle Evolution auf die Spitze getrieben wird . . . 167

GERD GIGERENZER

Bauchentscheidungen

Die Intelligenz des Unbewussten 187

PETER VON MATT

Übeltäter, trockne Schleicher, Lichtgestalten

Die Wissenschaftler in der öffentlichen Phantasie 227

Die Autoren 241

Eva-Maria Neher

Vorwort

Das Erscheinen dieses Bandes fällt mit den letzten Vorbereitungen für das 10. XLAB Science Festival im Januar 2014 zusammen. Es öffnet in bewährter Weise die Pforten eines großen Hörsaals der Universität Göttingen für Schüler, Lehrer und die Göttinger Bevölkerung. Von 2004-2013 haben rund 18.000 Zuhörer beim Science Festival etwas über die neuesten Arbeitsgebiete und frühere Durchbrüche der naturwissenschaftlichen Disziplinen erfahren.

Vorbild für die Science Festivals sind die Lindauer Nobelpreisträger-tagungen. Nobelpreisträger der Physik, Chemie und Medizin oder Physiologie halten einmal im Jahr am Bodensee für eine große Zahl weltweit nominierter Nachwuchswissenschaftler Vorträge. Jedem Nobelpreisträger ist es selbst überlassen, was er seinem Publikum mitgeben will, sei es ein Rückblick auf die Stationen bis zur bahnbrechenden Entdeckung, sei es eine neue, spannende Fragestellung, sei es eine Vision. Die hochkarätigen Redner und das auserlesene Publikum profitieren wechselseitig voneinander. Verstanden zu werden und zu verstehen, Fragen zu stellen und intelligente Fragen zu beantworten, bereichern beide Generationen. In Lindau gibt es nicht nur die Vorträge im Plenum, sondern auch Diskussionsveranstaltungen, Workshops, Masterclasses, das Science Breakfast und eine gemeinsame Bootsfahrt zur Insel Mainau, bei denen zwanglose Gespräche zwischen Laureaten und Nachwuchswissenschaftlern möglich sind.

Die XLAB Science Festivals sind natürlich bescheidenere Veranstaltungen. Die Wissenschaftler, die uns einen Vortrag halten, stellen sich einer ungewohnten Aufgabe, denn Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe sind ein besonderes Publikum. Sie sind auf dem Höhepunkt ihrer schulischen Bildung, haben jedoch wenig Erfahrung und ihr Wissen ist noch wenig vernetzt. Wenn man über ihre Köpfe hinwegredet, hat man sie als Zuhörer schnell verloren, weil sie noch nicht geübt sind, Verständnislücken zu überspringen. Ihnen andererseits bloß einen bunten Strauß von Eindrücken geben zu wollen wie etwa einem Ausstellungspublikum hieße, ihnen einen realistischen Einblick in das, was ein Studium und wissenschaftliches Arbeiten be-

deuten, vorzuenthalten. Zu dieser Realität gehören Anstrengung, ein großes tägliches Arbeitspensum und unvorhersehbare Schwierigkeiten genauso wie Begeisterung, kleine und große Erfolge und manchmal sensationelle Durchbrüche. Ob Nobelpreisträger, wie Richard R. Ernst, Robert Huber, Erwin Neher, Paul Crutzen, Peter Grünberg, Aaron Ciechanover und Jean-Marie Lehn, oder Nachwuchswissenschaftler, wie Dirk Brockmann, Christian Voigt, Anna Frebel, Markus Hartl, Julia Stähler, Nina Schaller und Janina Zimmermann: Jeder Vortragende hat den Schülerinnen und Schülern auf seine Art etwas zu geben. Für einen Experimentalvortrag entschieden sich Herbert Roesky und Birger Kollmeier. Ausgefeilte, computergestützte Lösungen für fachdidaktische Probleme präsentierten Hans-Peter Nollert und Jürgen Tautz, während Helmut Schwarz zeigte, dass im Prinzip ein Tafelbild ausreicht, um das Publikum in den Bann zu ziehen. Der Hörsaal ist ein Ort des Lernens und Verstehens und nicht primär der Unterhaltung. Das junge Publikum ist darauf eingestellt und übertrifft mit dieser Ernsthaftigkeit ein typisches Festvortragspublikum. Schüler, die Vertrauen zu einem Vortragenden gewinnen, stellen ohne Scheu viele Fragen. Wenn eine wissenschaftliche Sensation sich zeitnah in einem Science Festival-Vortrag niederschlägt wie 2006 die erste Rekonstruktion bronzezeitlicher Verwandtschaftsbeziehungen (Beitrag von Susanne Hummel), 2009 die ersten MRT-Filme (Beitrag von Jens Frahm) oder 2012 die Entdeckung des Higgs-Bosons (Beitrag von Arnulf Quadt), ist das ein Glücksfall. Besonders interessant waren auch die Beiträge Göttinger Forscher zur Eindämmung von Epidemien, z.B. von Bertram Brenig und Gerhard Gottschalk.

Weil jeder Vortragende die Schülerinnen und Schüler auf seine sehr persönliche Art anspricht, ist es wünschenswert, dass diese am gesamten Festival teilnehmen. Lehrer schätzen das unseres Wissens einmalige Angebot und nehmen bei der Anreise mit ihren Schülergruppen Fahrzeiten bis zu zwei Stunden in Kauf. Allerdings scheint es einigen schwer zu fallen, z.B. den eigenen Chemie-Leistungskurs zusätzlich zu Biologie- und Physik-Vorträgen zu begleiten und dafür die Erlaubnis von der Schulleitung zu erhalten. Die aktuellen Fragestellungen verschiedener Disziplinen intensiv und jenseits des Schulstoffs zu erleben, ist nach unserer Überzeugung jedoch die wichtigste Voraussetzung für die Wahl des Studienfachs; eine immer frühere Spezialisierung unter Verlust der fachlichen Breite ist kurzsichtig und abzulehnen. Daher stellen wir die Science Festivals bewusst nicht unter ein bestimmtes Thema,

sondern am Rednerpult wechseln sich Biologen (wie Walter Gehring, Heinz Saedler, Hanns Hatt, Manfred Ayasse, Julia Fischer und Bert Hölldobler), Chemiker (wie Dietmar Stalke, Walter Steurer und Klaus Müllen), Physiker (wie Konrad Samwer, Anton Zeilinger, Rainer Schwenn und Ulrich Christensen), Mathematiker (wie Dieter Kotschick, Peter Deuflhard) und Mediziner (wie Wolf Singer, Michael Schultz, Joachim Bauer, Ethel-Michele de Villiers) ab. Mit Erstaunen registrierte der eine oder andere Zuhörer, dass der Chemiker Ulf Diederichsen sich hauptberuflich mit den biologischen Makromolekülen beschäftigt, von denen man im Biologie-Unterricht gehört hat, wieviel Physik zur Neurobiologie gehört (zu hören z.B. bei Michael Hörner und Peter Fromherz), dass Solarzellen und Nanomaschinen nach dem Beispiel der Natur entwickelt werden (Vorträge von Michael Grätzel und Peter Fratzl) und dass Biologen und Physiker gleichermaßen Beiträge zur Klimaforschung leisten (wie Bo Barker Jørgensen, Frank Wilhelms, Stefan Rahmstorf). Eine die Disziplinen verbindende Einrichtung par excellence ist das Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Nachbar und Förderer des XLAB; von dort kamen fast jedes Jahr Redner, zuletzt Marina Rodnina und Herbert Jäckle. Zum Abendvortrag zieht das Festivalpublikum jedes Jahr vom naturwissenschaftlichen Campus in die repräsentative Aula am Wilhelmsplatz. Redner waren die Germanisten Albrecht Schöne und Peter von Matt, der Historiker Mark Walker, PISA-Mitbegründer Andreas Schleicher, die Psychologen Onur Güntürkün und Gerd Gigerenzer, der Theologe Christoph Marksches und der Mediziner Eckart Altenmüller. Sie alle haben die Einbettung der Naturwissenschaften in ihre Zeit und gesellschaftliche Funktion aufgezeigt; diese Vorträge erfreuen sich beim Publikum großer Beliebtheit.

Für das XLAB ist es ein Privileg, an der Schnittstelle von Schule und Hochschule zu arbeiten. Wir danken den Festival-Sponsoren der ersten 10 Jahre, besonders dem CNMPB, dem Universitätsbund Göttingen, der Max-Planck-Gesellschaft, der Klaus-Tschira-Stiftung und der AKB-Stiftung. Unser Dank gilt allen Rednerinnen und Rednern, die die Chance ergriffen haben, junge Menschen mit Begeisterung für ihr Forschungsgebiet anzustecken. Wir freuen uns auf die Vorträge beim Science Festival 2014, die wieder einen großen thematischen Bogen schlagen: Antje Boetius (Tiefseeökologie), Stefan Hell (STED-Mikroskopie), Peter Hegemann (Optogenetik), Richard Neher (Evolution von Viren), Christiane Nüsslein-Volhard (Entwicklungsbiologie, Gerhard

Wörner (Geochemie) und Manfred Jakubowski-Tiessen (Geschichte der frühen Neuzeit). Zum Science Festival möchten wir einladen, so lange es uns möglich ist.

Vorträge bei den XLAB Science Festivals 2004 bis 2013

2004

PROF. DR. RICHARD R. ERNST, Zürich, Nobelpreis für Chemie 1991
Faszinierende chemische, biologische und medizinische Einblicke in die Natur mittels »Kernspin-Spion«

PROF. DR. ROBERT HUBER, München, Nobelpreis für Chemie 1988
Proteinstrukturen – Innovation für Grundlagen und Anwendung in Chemie, Physik und Medizin

PROF. DR. ALBRECHT SCHÖNE, Göttingen
Lichtenbergs Göttinger Zwieback

PROF. DR. ERWIN NEHER, Göttingen, Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 1991
Informationsverarbeitung im Gehirn: Was macht die Signale in der Hörbahn so schnell?

PROF. DR. MICHAEL HÖRNER, Göttingen
Der 7. Sinn elektrischer Fische: Das Unterwasserpeilsystem von Nilhecht und Messerfisch

PROF. DR. HERBERT ROESKY, Göttingen
Weihnachtsvorlesung – Faszinierende chemische Experimente

2005

PROF. DR. WOLF SINGER, Frankfurt
Das Gehirn, ein Orchester ohne Dirigent

PROF. DR. PETER FROMHERZ, München
Hirn und Halbleiter

PROF. DR. ANTON ZEILINGER, Wien
Einsteins Schleier und Einsteins Spuk

PROF. MARK WALKER, New York
Naturwissenschaftler und Nationalsozialismus

VORWORT

PROF. DR. WALTER GEHRING, Basel

Die Entwicklung der Augen – tiefe Einblicke in die Werkstatt der Natur

PROF. DR. PAUL CRUTZEN, Mainz, Nobelpreis für Chemie 1995

Das antarktische Ozonloch – Menschliche Aktivitäten verändern die Stratosphäre

PROF. DR. KONRAD SAMWER, Göttingen

Glas: ein alter Werkstoff, aber aktuelle Physik

2006

PROF. DR. DIETMAR STALKE, Göttingen

Die Kunst, Atome sichtbar zu machen

PROF. DR. DIETER KOTSCHICK, München

Fullerene und Fußbälle aus mathematischer Sicht

DR. DIRK BROCKMANN, Göttingen

In 80 Tagen um die Welt – Modelle zur Ausbreitung moderner Seuchen

DR. ANDREAS SCHLEICHER, Paris

Herausforderungen für Bildungssysteme in einer neuen globalen Realität

PROF. DR. DR. BERTRAM BRENIG, Göttingen

Ist die Rinderseuche (BSE) ausgerottet? Früherkennung verhindert Massenschlachtungen

PROF. DR. DR. HANNS HATT, Bochum

Die Macht der Düfte: Vom Molekül zur Wahrnehmung

PROF. DR. BO BARKER JØRGENSEN, Bremen

Gashydrate, Tsunamis und Klimaentwicklung – gibt es einen Zusammenhang?

2007

PROF. DR. DR. MICHAEL SCHULTZ, Göttingen

Die Krankheiten unserer Vorfahren – moderne Paläopathologie

PROF. DR. HEINZ SAEDLER, Köln

Biodiversität und Evolution morphologischer Neuheiten bei Pflanzen

PROF. DR. JOACHIM BAUER, Freiburg

Das Geheimnis der Spiegel-Nervenzellen

PROF. DR. RAINER SCHWENN, Katlenburg-Lindau

Wie funktioniert das Weltraumwetter?

DR. CHRISTIAN VOIGT, Berlin
Moderne Wildtierforschung

PROF. DR. MICHAEL GRÄTZEL, Lausanne
Die Grätzelzelle – eine Solarzelle auf Basis der Fotosynthese

2009

DR. ANNA FREBEL, Boston
Die ältesten Sterne im Universum und die chemische Entwicklung unserer
Galaxie vom Urknall bis heute

PROF. DR. HELMUT SCHWARZ, Berlin
Die K-Frage in der Chemie: Katalysatoren als molekulare Heiratsvermittler

PROF. DR. PETER FRATZL, Potsdam
Ideenpool Natur: die außergewöhnlichen Eigenschaften von Biomaterialien

PROF. DR. ONUR GÜNTÜRKÜN, Bochum
Frauengehirn – Männergehirn: Fakten und Mythen zu einer alten Frage

PROF. DR. PETER GRÜNBERG, Jülich, Nobelpreis für Physik 2007
Spinpolarisation: Vom Stern Gerlach Experiment zum Riesenmagneto-
widerstandseffekt

PROF. DR. MANFRED AYASSE, Ulm
Chemische Mimikry als Bestäubungsstrategie bei Täuschorchideen

PROF. DR. BERT HÖLLDOBLER, Phoenix/USA
Ordnung und Chaos: Kommunikation und Kooperation in Ameisenstaaten

2010

PROF. DR. JULIA FISCHER, Göttingen
Aff Sprak? Eine Einführung in die Kommunikation von Affen

DR. JULIA STÄHLER, Berlin
In die Falle getappt: Elektronen auf dem Weg zum Gleichgewicht

MARKUS HARTL, Jena
Ökologische Gentechnik? Neue Wege zum Verständnis von Ökosystemen

PROF. DR. CHRISTOPH MARKSCHIES, Berlin
Wilhelm und Alexander – Das Verhältnis Alexanders zu seinem älteren
Bruder Wilhelm von Humboldt

VORWORT

PROF. DR. JENS FRAHM, Göttingen

Zum Leben erwacht: Magnetresonanz-Tomografie vom Bild zum Film

PROF. DR. PETER DEUFLHARD, Berlin

Algorithmen, die geheime Schlüsseltechnologie

PROF. DR. ULF DIEDERICHSEN, Göttingen

DNA, Peptide und Proteine: Chancen der Organischen Chemie

2011

PROF. DR. ULRICH CHRISTENSEN, Katlenburg-Lindau

Das Innere der Planeten und ihre Magnetfelder

DR. NINA SCHALLER, Frankfurt

Spitzenathlet im Federkleid – der Strauß im Fokus moderner Biomechanik

PROF. AARON CIECHANOVER, Haifa, Nobelpreis für Chemie 2004

Drug Development in the 21st century – Are we going to cure all diseases?

PROF. DR. ECKART ALTENMÜLLER, Hannover

Ist Musik die Sprache der Gefühle?

PROF. DR. DR. BIRGER KOLLMEIER, Oldenburg

Partys, MP3-Player und Hörgeräte – Leistungen physikalischer Hörmodelle

PD DR. HANS-PETER NOLLERT, Tübingen

Was Einstein gern gesehen hätte: Visualisierung relativistischer Effekte

PROF. DR. FRANK WILHELMS, Bremerhaven

Schnee von gestern? – Rekonstruktion vergangener Umweltbedingungen aus polaren Eisschilden

2012

DR. SUSANNE HUMMEL, Göttingen

Nach 3000 Jahren ins Labor: Die Analyse alter DNA

PROF. DR. KLAUS MÜLLEN, Mainz

Plastikwelt – Von der Alltagswirklichkeit zur Zukunftstechnologie

DR. JANINA ZIMMERMANN, Freiburg

Metallische Materialien in Kontakt mit Luft

PROF. DR. GERD GIGERENZER, Berlin

Bauchentscheidungen: Die Intelligenz des Unbewussten

PROF. JEAN-MARIE LEHN, Strasbourg, Nobelpreis für Chemie 1987

Von der Materie zum Leben: Chemie? Chemie!

PROF. DR. GERHARD GOTTSCHALK, Göttingen
EHEC: Wenn mikrobielle Evolution auf die Spitze getrieben wird

PROF. DR. STEFAN RAHMSTORF, Potsdam
Die Klimakrise

2013

PROF. MARINA RODNINA, Göttingen
Ribosomen – Die ältesten Nanomaschinen der Welt

PROF. DR. JÜRGEN TAUTZ, Würzburg
Die evolutionären Erfolgsrezepte der Honigbiene

PROF. DR. WALTER STEURER, Zürich
Quasikristalle und verbotene Symmetrien

PROF. DR. PETER VON MATT, Zürich
Übeltäter, trockne Schleicher, Lichtgestalten: Wissenschaftler in der öffentlichen Phantasie

PROF. DR. HERBERT JÄCKLE, Göttingen
Was wir von fetten Fliegen lernen: Die Genetik des Übergewichts

PROF. DR. ETHEL-MICHELE DE VILLIERS, Heidelberg
Papillomviren und die Gefahr des roten Fleisches

PROF. DR. ARNULF QUADT, Göttingen
Dem Higgs-Boson auf der Spur

Jean-Marie Lehn

Supramolekulare Chemie – Moleküle, Übermoleküle und molekulare Funktionseinheiten

(Nobel-Vortrag 1987)¹

Supramolekulare Chemie ist die Chemie der intermolekularen Bindung und beschäftigt sich mit Strukturen und Funktionen von Einheiten, die durch Assoziation von zwei oder mehr chemischen Spezies gebildet werden. Molekulare Erkennung in Übermolekülen, die bei der Rezeptor/Substrat-Bindung entstehen, beruht auf dem Prinzip der molekularen Komplementarität, wie es bei der Erkennung sphärischer, tetraedrischer und linearer Substrate durch Rezeptoren, Corezeptoren, Metallrezeptoren und amphiphile Rezeptoren vorgefunden wird. Supramolekulare Katalyse mit Rezeptoren, die reaktive Gruppen tragen, bewirkt Bindungsspaltungen und -knüpfungen durch Cokatalyse. Lipophile Rezeptoren können als selektive Carrier für verschiedenartige Substrate verwendet werden, und sie ermöglichen den Aufbau von Transportsystemen, die mit einem Elektronen- oder Protonengradienten oder mit einem Photoprozess gekoppelt sind. Während Endorezeptoren Substrate durch »konvergente Wechselwirkungen« in Molekülhohlräumen binden, werden bei Exorezeptoren die Substrate durch Wechselwirkungen zwischen den Außenflächen von Rezeptor und Substrat gebunden. Demgemäß lassen sich neue Typen von Rezeptoren, z. B. die Metallonucleate, entwickeln. In polymolekularen Aggregaten können Rezeptoren, Carrier und Katalysatoren zu molekularen und supramolekularen Funktionseinheiten führen, die strukturell organisierte und funktionell integrierte chemische Systeme sind (»supramolekulare Architektur«). Erkennungs-, Translokations- und Transformationsprozesse mit molekularen Funktionseinheiten werden unter dem Gesichtspunkt analysiert, ob sie durch Photonen, Elektronen oder

1 Wiederabdruck aus: Angewandte Chemie 100 (1988), S. 91-116. Copyright The Nobel Foundation 1988.

Ionen ausgelöst werden können. Auf diese Weise lassen sich die Gebiete der molekularen Photonik, Elektronik und Ionik definieren. Führt man photosensitive Gruppen ein, ergeben sich photoaktive Rezeptoren, die sich zur Lichtumwandlung und Ladungstrennung eignen. Redoxaktive, langkettige Polyolefine – »molekulare Drähte« – können Elektronen, z.B. durch Membranen, übertragen. Tubulare Mesophasen, die durch Stapelung geeigneter makrocyclischer Rezeptoren entstehen, können Ionenkanäle bilden. Bei acyclischen Liganden gibt es das Phänomen der molekularen Selbstorganisation, was zu Komplexen mit doppelt-helicaler Struktur führt. Derartige Entwicklungen im Bereich des »molekularen und supramolekularen Designs und Engineerings« lassen auf photonische, elektronische und ionische molekulare Funktionseinheiten hoffen, die hochselektive Erkennungs-, Umwandlungs- und Übertragungsprozesse – Verarbeitung von Signalen und Informationen auf molekularer Ebene – ausführen können.

1. Von der molekularen zur supramolekularen Chemie

Molekulare Chemie, die Chemie der kovalenten Bindung, beschäftigt sich mit den Regeln, die für die Strukturen, die Eigenschaften und die Umwandlungen molekularer Spezies maßgebend sind. Supramolekulare Chemie kann als »Chemie jenseits des Moleküls« definiert werden. Sie bezieht sich auf organisierte komplexe Einheiten, die aus der Zusammenlagerung von zwei oder mehr chemischen Spezies hervorgehen und durch zwischenmolekulare Kräfte zusammengehalten werden. Ihre Erschließung erfordert den Einsatz sämtlicher Hilfsmittel der molekularen Chemie und die intelligente Nutzung nichtkovalenter Wechselwirkungen. Die entstehenden supramolekularen Einheiten bezeichnen wir als Übermoleküle, die ebenso gut definierte Eigenschaften haben wie Moleküle. Man kann sagen: Was für Moleküle Atome und kovalente Bindungen sind, sind für Übermoleküle Moleküle und zwischenmolekulare Kräfte.

Die Grundkonzepte, die Terminologie und die Definitionen der supramolekularen Chemie wurden schon früher dargelegt^[1-3] und werden hier lediglich kurz zusammengefasst. In Abschnitt 2.3 wird ein kurzer Bericht über die Ursprünge und die frühen Entwicklungen unserer Arbeiten gegeben, die zu dem führten, was wir heute supramolekulare Chemie nennen.

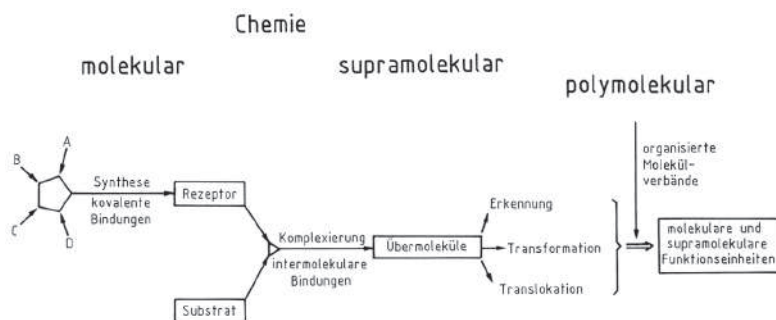


Abbildung 1: Schematische Erläuterung des Zusammenhangs zwischen molekularer und supramolekularer Chemie.

Die Assoziation von Molekülen ist schon seit geraumer Zeit bekannt und erforscht worden.^[4] Der Begriff »Übermolekül« wurde bereits Mitte der dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts eingeführt, um höher organisierte Einheiten zu beschreiben, die aus der Zusammenlagerung von koordinativ gesättigten Spezies hervorgehen.^[5] Die Partner einer supramolekularen Spezies – eines Übermoleküls oder Überkomplexes – werden als molekularer Rezeptor und Substrat ^[1, 2, 65] bezeichnet, wobei es sich beim Substrat gewöhnlich um die kleinere Komponente handelt, die gebunden werden soll. Diese Terminologie vermittelt den Bezug zu biologischen Rezeptoren und Substraten, für die Paul Ehrlich feststellte, dass Moleküle keine Wirkung zeigen, wenn sie nicht gebunden sind (*Corpora non agunt nisi fixata*). Der häufig gebrauchte Begriff Ligand schien wegen seiner oft unspezifischen Anwendung auf beide Partner eines Komplexes weniger gut geeignet.

Molekulare Wechselwirkungen sind die Basis für die hochselektiven Erkennungs-, Reaktions-, Transport- und Regulationsprozesse, denen man in der Biologie begegnet. Folglich sind die molekulare Erkennung, die Transformation und die Translokation grundlegende Funktionen supramolekularer Spezies. Noch kompliziertere Funktionen dürften sich aus dem Wechselspiel von mehreren Bindungseinheiten in einem polytopen Corezeptor ergeben. Im Zusammenhang mit geordneten polymolekularen Aggregaten und Phasen (dünnen Schichten, Membranen, Vesikeln, Flüssigkristallen usw.) könnten funktionelle Übermoleküle zur Entwicklung molekularer Funktionseinheiten führen. In diesem Beitrag werden die verschiedenartigen Aspekte der supramolekularen Chemie diskutiert (Abb. 1) und einige Entwicklungsmög-

lichkeiten skizziert wie z.B. Substratbindung an ein Rezeptorprotein, enzymatische Reaktionen, Bildung von Protein/Protein-Komplexen, immunologische Antigen/Antikörper-Assoziation, Replikation, Translation und Transkription des genetischen Codes, Signalauslösung durch Neurotransmitter, zelluläre Erkennung usw. Das Design von künstlichen, abiotischen Rezeptoren, die mit höchstem Wirkungsgrad und höchster Selektivität »funktionieren«, erfordert präzisen Umgang mit den energetischen und stereochemischen Besonderheiten nichtkovalenter Kräfte (elektrostatischer Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindung, Van-der-Waals-Kräfte etc.) im Bereich einer definierten molekularen Architektur. Gelingt dies, dann dürfte der Chemiker die genialen biologischen Vorgänge als Ideenquelle nutzen können; diese ermutigen, dass derart hohe Wirksamkeiten, Selektivitäten und Geschwindigkeiten tatsächlich zu erreichen sind. Die Chemie ist allerdings nicht auf Systeme begrenzt, wie sie so oder ähnlich in der Biologie vorkommen, sie kann auch völlig neuartige Spezies und Prozesse ersinnen.

Bindung eines Substrats an seinen Rezeptor ergibt ein Übermolekül, wobei eine molekulare Erkennung Voraussetzung ist. Sofern der Rezeptor neben der Bindung noch reaktive Funktionen ausüben kann, kann er am gebundenen Substrat eine chemische Umwandlung auslösen und sich daher wie ein supramolekulares Reagens oder wie ein supramolekularer Katalysator verhalten. Ein lipophiler, membranlöslicher Rezeptor kann als Carrier fungieren, der die Translokation des gebundenen Substrats bewirkt (frühere allgemeine Ausführungen siehe [1-3, 6-9]). Die Ergebnisse, über die hier berichtet wird, gehen vorwiegend auf unsere Arbeiten zurück. Ergänzend wird aber auch auf die Befunde anderer Arbeitsgruppen hingewiesen, um ein umfassenderes Bild dieses sich rasch entwickelnden Gebietes zu zeichnen. Hervorgehoben werden immer wieder die konzeptionellen Grundlagen, die interessierenden Verbindungsklassen und Prozesstypen. Angesichts der immensen Literatur und der vielen Tagungen und Symposien zum Thema ist es unmöglich, allen Facetten dieses Gebiets gerecht zu werden, geschweige denn es umfassend zu präsentieren. Die supramolekulare Chemie entfaltet sich rasch in den Grenzbereichen der sich mit physikalischen und biologischen Phänomenen auf molekularer Ebene beschäftigenden Wissenschaften.

2. Molekulare Erkennung

2.1 Erkennung – Information – Komplementarität

Molekulare Erkennung ist als Selektion und Bindung eines Substratmoleküls (oder mehrerer Substratmoleküle) durch ein Rezeptormolekül definiert worden, wobei auch eine spezifische Funktion im Spiel sein kann.^[1] Bloße Bindung ist noch keine Erkennung, obwohl dies häufig so verstanden wird. Man könnte sagen, Erkennung ist zweckgebundene Bindung, genauso wie Rezeptoren zweckgebundene Liganden sind. Dies bedeutet, dass eine klar umrissene Palette zwischenmolekularer Wechselwirkungen beteiligt ist.

Die Bindung eines Substrats σ an einen Rezeptor q ergibt ein Übermolekül σq , das durch seine thermodynamische und kinetische Stabilität gekennzeichnet ist; für den Bindungsprozess sind die aufzuwendende oder freigesetzte Energie und der beteiligte Informationsfluss charakteristisch und bestimmen die Selektivität. Molekulare Erkennung ist daher eine Frage der Speicherung und des Auslesens von Information auf supramolekularer Ebene. Information kann in der Struktur des Rezeptors q , in seinen Bindungsstellen (Art, Anzahl, Anordnung) und in der das gebundene Substrat σ umgebenden Ligandschicht gespeichert sein. Sie wird mit der Geschwindigkeit der Bildung und Zerlegung des Übermoleküls ausgelesen. Infolgedessen entspricht die molekulare Erkennung dem größtmöglichen Informationsgehalt von q für ein bestimmtes σ .^[1]

Dies kommt einem verallgemeinerten Prinzip der paarweisen Komplementarität gleich, welches sowohl energetische (elektronische) wie geometrische Komponenten enthält und der berühmten »Schlüssel-Schloss«-Vorstellung Emil Fischers aus dem Jahre 1894 entspricht.^[10] Ein höheres Ausmaß an Erkennung, als sie durch einen einzelnen Gleichgewichtsschritt möglich ist, kann durch mehrstufige Erkennungsprozesse und Kopplung an einen irreversiblen Prozess erreicht werden.^[11]

Die Ideen der molekularen Erkennung und der Rezeptorchemie sind im Laufe der letzten fünfzehn Jahre in viele Bereiche der Chemie mehr und mehr eingedrungen, vor allem wegen ihrer Konsequenzen für die Bioorganische Chemie oder, noch allgemeiner, wegen ihrer Bedeutung für chemische Selektivität und zwischenmolekulare Kräfte.^[1-3, 6-9, 12-21]

2.2 Molekulare Rezeptoren – Bauprinzipien

Rezeptorchemie kann man als verallgemeinerte Koordinationschemie auffassen, die nicht auf Übergangsmetallionen begrenzt ist, sondern sich über das gesamte Spektrum von Substraten erstreckt: kationische, anionische oder neutrale Spezies organischer, anorganischer oder biologischer Natur.

Um hohe Erkennung zu erreichen, sollten sich Rezeptor q und Substrat σ über eine möglichst große Kontaktfläche berühren können. Dies ist dann gegeben, wenn der Wirt q den Gast σ so umhüllen kann, dass zahlreiche nichtkovalente bindende Wechselwirkungen zum Tragen kommen und Größe, Gestalt und Architektur von σ wahrgenommen werden. Dies gilt für Rezeptoren mit intramolekularen Hohlräumen, in die das Substrat σ hineinpasst. Daraus resultiert ein Einschlusskomplex, ein Cryptat. In solchen konkaven Rezeptoren ist der Hohlraum mit Bindungsstellen ausgekleidet, die der gebundenen Spezies zugekehrt sind; sie sind endopolarophil^[1] und konvergent und können daher als Endorezeptoren bezeichnet werden (siehe Abschnitt 7).

Makropolycyclische Strukturen erfüllen die Anforderungen für künstliche Rezeptoren in folgenden Punkten: Sie sind groß (makro) und dürften deshalb Hohlräume und Spalten geeigneter Größe und Form aufweisen; sie verfügen über zahlreiche Verzweigungen, Brücken und Verknüpfungsstellen (polycyclisch), wodurch der Aufbau einer bestimmten Struktur mit den gewünschten dynamischen Merkmalen ermöglicht wird; sie gestatten die systematische Anordnung von strukturbildenden Gruppen, Bindungsstellen und reaktiven Funktionen.

Die Balance zwischen Starrheit und Flexibilität ist für die dynamischen Eigenschaften von σ und q von besonderer Bedeutung. Obgleich hohe Erkennung schon durch starr aufgebaute Rezeptoren erreicht werden kann, erfordern Austauschvorgänge, Regulation, Kooperativität und Allosterie strukturelle Flexibilität, so dass q auf Veränderungen reagieren und sich anpassen kann. Flexibilität ist bei biologischen Rezeptor/Substrat-Wechselwirkungen besonders wichtig, wo sehr oft Anpassung notwendig ist, damit Regulation eintritt. Dynamische Eigenschaften von Rezeptoren zu beherrschen, ist viel schwieriger, als ihnen bloße Starrheit zu verleihen. Neuere Entwicklungen beim computergestützten Moleküldesign, die die Erkundung sowohl struktureller als auch dynamischer Parameter ermöglichen, dürften dabei eine

große Hilfe sein.^[22] Rezeptordesign heißt, statische und dynamische Eigenschaften makropolycyclischer Strukturen zu planen.

Stabilität und Selektivität bei der Bindung von σ lassen sich auf die Gesamtmenge an Wechselwirkungsstellen in q zurückführen. Es geht also um ein Zusammenbringen und Organisieren von Bindungsstellen. Modellberechnungen an $(\text{NH}_3)_n$ -Clustern unterschiedlicher Geometrie haben gezeigt, dass beim Zusammenbringen merklich größere Energiebeträge umgesetzt werden als beim Organisieren.^[23] Bei mehrzähligen Liganden muss die Abstoßung zwischen den Bindungsstellen während der Synthese überwunden werden.

Wir haben Rezeptoren aus verschiedenen Klassen makropolycyclischer Strukturen (Makrocyclen, Makrobicyclen, zylindrische und sphärische Makrotricyclen usw.) untersucht und damit unsere ursprünglichen Arbeiten über Cryptate aus Makrobicyclen und Kationen schrittweise ausgedehnt; dabei haben wir uns mit Strukturen und Funktionen von Übermolekülen, mit molekularer Erkennung, Katalyse und Transportvorgängen beschäftigt.

2.3 Frühe Studien – Erkennung sphärischer Substrate und die Bildung von Cryptat-Komplexen

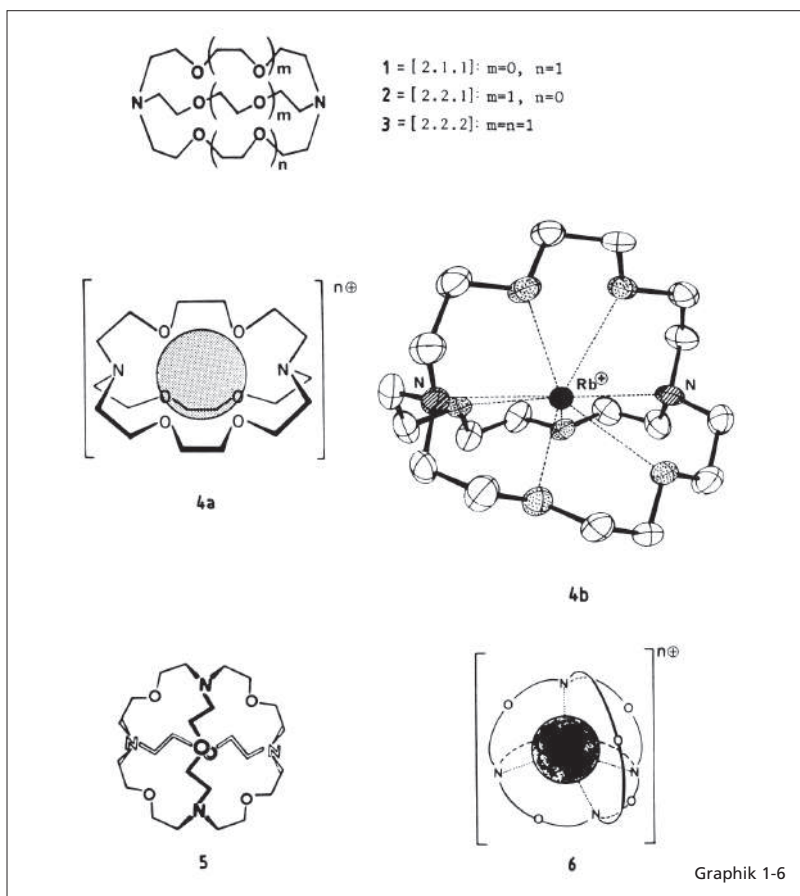
Die einfachste Erkennung ist die sphärischer Substrate, bei denen es sich entweder um Metall-Kationen (Alkalimetall-, Erdalkalimetall-, Lanthanoid-Ionen) oder Halogenid-Ionen handelt. Im Laufe der letzten zwanzig Jahre hat sich die Komplexchemie der Alkalimetall-Kationen durch die Entdeckung verschiedener Klassen mehr oder weniger wirksamer und selektiver Liganden stürmisch entwickelt: zu den Liganden gehören natürliche^[24] und synthetische^[25-26] Makrocyclen (Valinomycin, [18]Krone-6, Sphäranden etc.) sowie makropolycyclische Cryptanden und Cryptosphäranden.^[1, 6, 9, 26, 27] Es war die Chemie der Alkalimetall-Cryptate, mit der wir unsere Aktivitäten auf diesem Gebiet begannen und woraus schließlich die supramolekulare Chemie wurde.

Dies ist die passende Stelle, etwas über den Beginn unserer Arbeit zu sagen, über unsere anfängliche Motivation und über die Herausbildung der ersten Forschungsprojekte. Im Laufe des Jahres 1966 brachte mich mein Interesse an Prozessen im Nervensystem zu der Frage, was ein Chemiker zum Verständnis derartiger komplexer biologischer Prozesse beitragen kann. Die elektrischen Phänomene in Nervenzellen beruhen

auf Veränderungen der Konzentrationsgradienten von Natrium- und Kalium-Ionen über Membranen. Dies schien einen möglichen Einstieg in das Feld zu bieten, besonders weil gerade gezeigt worden war, dass das Cyclodepsipeptid Valinomycin,^[24c] über dessen Struktur und Synthese kurz zuvor berichtet worden war,^[24d] den Transport von Kalium-Ionen in Mitochondrien vermittelt.^[24e] Die Ergebnisse^[24d,e] führten mich zu der Annahme, dass passend konstruierte synthetische Cyclopeptide oder Analoga verwendet werden könnten, um den Kationenkonzentrationsgradienten über Membranen zu messen und künstlichen Ionentransport zu bewerkstelligen. Derartige Eigenschaften wiesen auch andere neutrale Antibiotica^[24f] der Enniatin- und Actingruppe^[24g] auf. Als Ursache wurde die selektive Komplexierung von Alkalimetall-Kationen^[24h-l] ermittelt; bei den Komplexbildnern handelte es sich also um Ionophore.^[24m] Wir vermuteten dann, dass die Kationen-Komplexierung die Reaktivität des Gegenions erhöhen würde (Anionen-Aktivierung);^[6,35] damit rückten Verbindungen auf die Wunschliste, die weniger reaktiv sind als Cyclopeptide, aber genauso gute Komplexbildner.² Als dann Charles Pedersen über die kationenbindenden Eigenschaften makrocyclischer Polyether (Kronenether) berichtete,^[25a] sahen wir in diesen Verbindungen die Komplexierungseigenschaften makrocyclischer Antibiotica und die chemische Stabilität einfacher Ether vereinigt. In der Zwischenzeit war auch klar geworden, dass Moleküle mit einem sphärischen Hohlraum, in den ein Ion genau hineinpasst, stärkere Komplexe bilden sollten als z.B. flache Moleküle. So entwickelte sich die Idee, makrobicyclische Liganden zu synthetisieren.

Unsere Arbeit begannen wir im Oktober 1967 und wir erhielten den ersten derartigen Liganden 3 ([2.2.2] in Graphik 1-6) im Herbst 1968. Die sehr starke Bindung von Kalium-Ionen fiel sofort auf, und dem Komplex wurde eine Cryptatstruktur zugeschrieben; an eine mögliche Verwendung zur Anionen-Aktivierung und zum Kationen-Transport konnte deshalb schon gedacht werden.^[29a] Andere Liganden, z.B. 1 und

- 2 Frühere Beobachtungen sprachen dafür, dass Polyether mit Alkalimetall-Kationen in Wechselwirkung treten. Siehe beispielsweise H. C. Brown, F. J. Mead, P. A. Tierney, J. Am. Chem. Soc. 79 (1957) 5400; J. L. Down, J. Lewis, B. Moore, G. Wilkinson, J. Chem. Soc. 1959, 3767; Vorschläge für organische Liganden waren auch schon früher gemacht worden; siehe R. J. P. Williams, Analyst (London) 78 (1953) 586; Q. Rev. Chem. Soc. 14 (1970) 331.



2 in Graphik 1-6 und auch größere, wurden synthetisiert.^[29b] Ihre Strukturen wurden durch Röntgenbeugung an einer Reihe von Komplexen, z.B. den Rubidium-Cryptaten **4b**^[29c] von **3**, bestimmt, und ihre Stabilitätskonstanten wurden gemessen.

- 3 Zur Benennung der neuen Verbindungsklasse wurde ein Begriff gewählt, der seine Wurzeln im Griechischen und Lateinischen hat und im Französischen, Englischen und Deutschen (und möglicherweise auch in weiteren Sprachen) gleichermaßen aussagekräftig ist. »Cryptat« schien besonders passend zur Bezeichnung eines Komplexes, bei dem sich ein Kation im Innern eines Molekülhohlraums befindet; der freie Ligand wurde »Cryptand« genannt.

Das Problem der Erkennung sphärischer Substrate besteht darin, ein bestimmtes Ion aus einem Gemisch verschiedener sphärischer Ionen gleicher Ladung auszuwählen. Infolgedessen bilden die makropolycyclischen Cryptanden 1-3 mit Kationen, deren Größe zur Hohlraumgröße komplementär ist, d.h. Li^+ mit 1, Na^+ mit 2 und K^+ mit 3, selektiv sehr stabile Cryptate $[\text{M}^{n+} \subset (\text{Cryptand})]$ 4a, z.B. 4b.^[28a, 29a] Andere Cryptanden zeigen hohe Selektivität für Alkali- gegenüber Erdalkalimetall-Kationen.^[28b]

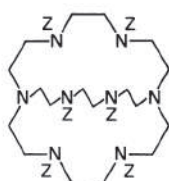
Somit können Erkennungseigenschaften erreicht werden, die vergleichbar oder besser sind als die natürlicher makrocyclischer Liganden. Der sphärische makrotricyclische Cryptand 5 bindet stark und selektiv die größeren sphärischen Kationen, z.B. Cs^+ (siehe 6).^[30]

Protoniert bilden die Polyamine 7^[31] und 5^[32] mit den sphärischen Halogenid-Ionen F^- bzw. Cl^- Anion-Cryptate. Tetraprotoniertes 5 komplexiert Cl^- viel besser als Br^- und andere Anionen und ergibt dabei das Cryptat $[\text{Cl}^- \subset (5-4\text{H}^+)]$ 8. Sauerstofffreie quartäre Ammoniumderivate dieses makrotricyclischen Ligandtyps binden ebenfalls sphärische Anionen.^[33]

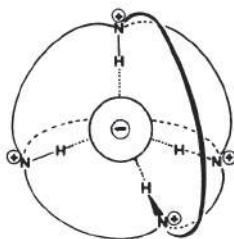
Folglich eignen sich die Cryptanden 1-3 und 5 sowie verwandte Verbindungen zur Erkennung sphärischer Kationen und Anionen (sphärische Erkennung). Ihre Komplexierungseigenschaften beruhen auf der makropolycyclischen Struktur; maßgebend ist der so genannte Cryptateffekt, der durch folgende Punkte gekennzeichnet ist: hohe Selektivitäten bei der Komplexbildung und hohe Stabilitäten sowie langsame Austauschgeschwindigkeiten der Komplexe und wirkungsvolle Abschirmung der gebundenen Substrate von der Umgebung. Daraus ergibt sich, dass durch Cryptatbildung physikalische Eigenschaften und chemische Reaktivität von Rezeptor und Substrat stark beeinflusst werden. Dies wurde in der Zwischenzeit vielfach genutzt, z.B. bei der Stabilisierung von Alkalimetall-Anionen (»Alkaliden«) und Elektriden,^[34] bei der Dissoziation von Ionenpaaren, bei der Anionen-Aktivierung, bei der Isotopentrennung, bei der Bindung toxischer Metalle usw. Auf diese Befunde wird hier nicht näher eingegangen, da entsprechende Übersichten vorliegen.^[6, 35-38]

2.4 Erkennung tetraedrischer Substrate

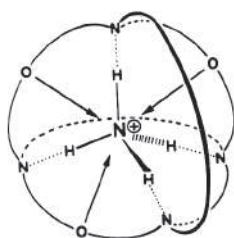
Die selektive Bindung eines tetraedrischen Substrats erfordert ein Rezeptormolekül, das über eine tetraedrische Erkennungsstelle ver-



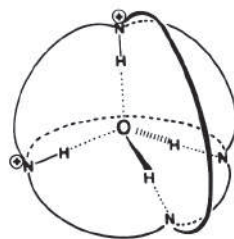
7, Z=H



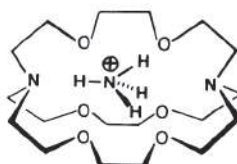
8



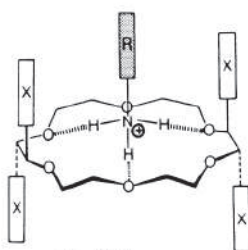
9



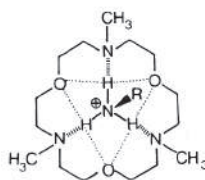
10



11



12a, X=H
 12b, X=CO₂⁻
 12c, X=CONYY'



13

Graphik 7-13

fügt, wie sie z.B. beim Makrotricyclus 5 vorhanden ist. Dieser enthält vier Stickstoff- und sechs Sauerstoffatome, die sich an den Ecken eines Tetraeders bzw. Oktaeders befinden.^[30] Tatsächlich bildet 5 mit dem tetraedrischen NH_4^+ -Ion hochselektiv ein extrem stabiles Cryptat, $[\text{NH}_4^+ \subset 5]9$, was auf das hohe Maß an struktureller und energetischer Komplementarität zurückzuführen ist. NH_4^+ weist eine für den Hohlraum von 5 passende Größe und Form auf und kann eine tetraedrische Anordnung von $^+\text{N}-\text{H}\cdots\text{N}$ -Wasserstoffbrückenbindungen mit den vier Stickstoffatomen aufbauen.^[39] Infolge der sehr starken Bindung liegt der $\text{p}K_a$ des NH_4^+ -Cryptats ungefähr sechs Einheiten höher als der von freiem NH_4^+ . Dies verdeutlicht, wie sehr die Eigenschaften eines Substrats durch starke Bindung beeinflusst werden können. Es weist auch darauf hin, dass im aktiven Zentrum eines Enzyms und bei der biologischen Rezeptor/Substrat-Bindung ähnliche Effekte vorkommen.

Das ungewöhnliche Protonierungsverhalten von 5 in wässriger Lösung (hoher $\text{p}K_a$ für die doppelte Protonierung, sehr langsamer Austausch) und die Ergebnisse von ^{17}O -NMR-Untersuchungen führten zu der Formulierung eines Wasser-Cryptats, $[\text{H}_2\text{O} \subset (5-2\text{H}^+)]10$, bei dem der Makrotricyclus diprotoniert ist.^[2, 6, 40] Die Erleichterung der zweiten Protonierung von 5 ist Folge einer positiven Kooperativität, wobei das erste Proton und das »Effektor«-Molekül Wasser strukturell und energetisch für die Bindung des zweiten Protons den Weg bereiten.

Zusammengenommen lassen die drei Cryptate $[\text{NH}_4^+ \subset 5]9$, $[\text{H}_2\text{O} \subset (5-2\text{H}^+)]10$ und $[\text{Cl}^- \subset (5-4\text{H}^+)]8$ erkennen, dass der sphärische Makrotricyclus 5 eine tetraedrische Erkennung ermöglicht; der molekulare Rezeptor bindet die Substrate über tetraedrisch angeordnete Wasserstoffbrückenbindungen. Dieses Beispiel veranschaulicht, wie weit das molekulare Engineering in der abiotischen Rezeptorchemie bereits gediehen ist. Da ein tetraedrisches Kation (NH_4^+), ein gewinkeltes Neutalmolekül (H_2O) und ein sphärisches Anion (Cl^-) vom Liganden 5 gebunden werden, wenn dieser unprotoniert, diprotoniert bzw. tetraprotoniert vorliegt, kann 5 als eine Art molekulares Chamäleon bezeichnet werden, das auf pH-Änderungen des Mediums anspricht.

Auch der Makrobicyclus 3 bindet NH_4^+ und bildet dabei das Cryptat 11. Die Unterschiede in der Rezeptor/Substrat-Komplementarität in 11 und 9 spiegeln sich in deren dynamischen Eigenschaften wider: Während NH_4^+ bei 9 im Hohlraum des Liganden vollständig fixiert ist, rotiert es im Hohlraum von 11.^[41]

2.5 Erkennung von Ammonium-Ionen und verwandten Substraten

In Anbetracht der wichtigen Rolle, die substituierte Ammonium-Ionen in Chemie und Biologie spielen, ist die Entwicklung von Rezeptoren, welche die Erkennung solcher Substrate ermöglichen, von besonderem Interesse. Makrocyclische Polyether binden primäre Ammonium-Ionen so, dass sie die NH_4^+ -Gruppe in ihrem ringförmigen Hohlraum durch drei $^+\text{N}-\text{H}\cdots\text{N}$ -Wasserstoffbrückenbindungen verankern (siehe 12).^[12-15, 25, 42] Sie komplexieren aber Alkalimetall-Ionen wie K^+ stärker. Die selektive Bindung von $\text{R}-\text{NH}_3^+$ wurde folgendermaßen erreicht: In Kenntnis der Ergebnisse, die bei der Komplexierung von NH_4^+ durch 5 erzielt wurden, wendeten wir uns jenen Oxaaza-Makrocyclen^[15, 43] zu, die bei den Cryptandsynthesen erschlossen wurden.^[29a, b, 30] Tatsächlich bindet der Triaza-Makrocyclus⁴ [18]- N_3O_3 aus einem Gemisch von $\text{R}-\text{NH}_3^+$ und K^+ bevorzugt das Ammonium-Ion; im Komplex 13 liegt eine komplementäre Anordnung von drei $^+\text{N}-\text{H}\cdots\text{N}$ -Bindungen vor. Der [18]- N_3O_3 -Ligand ist damit ein Rezeptor für $\text{R}-\text{NH}_3^+$.^[43]

Inzwischen kennt man eine große Zahl makrocyclischer Polyether, die $\text{R}-\text{NH}_3^+$ -Ionen selektiv – auch enantioselektiv – komplexieren.^[12, 13, 42] Das Tetracarboxylat 12b, das den günstigen Grundcyclus [18]- O_6 enthält und bei dem zusätzlich elektrostatische Wechselwirkungen ins Spiel kommen, bildet von allen makrocyclischen Polyethern die stabilsten Komplexe mit Metall- und Ammonium-Ionen.^[44] Man beobachtet zentrale Diskriminierung; dabei werden primäre Ammonium-Ionen den höher substituierten vorgezogen. Dies ermöglicht die selektive Bindung von biologisch wirksamen Ionen wie Noradrenalin oder Norephedrin in Gegenwart ihrer N-methylierten Derivate Adrenalin bzw. Ephedrin.^[44]

Über Änderungen der Seitengruppen X können die Komplexeigenschaften von 12 variiert werden. Durch das Ausnutzen spezifischer Wechselwirkungen (elektrostatische und lipophile Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindung, Ladungstransfer etc.) zwischen X und der Gruppe R des zentral gebundenen Substrats $\text{R}-\text{NH}_3^+$ erzielt man eine laterale Diskriminierung. Dies demonstriert ganz allgemein, wie die Wechselwirkungen nachgeahmt werden können, die in biologischen Rezeptor/Substrat-Komplexen wichtig sind, z.B. die Wechsel-

4 Diese Nomenklatur gibt in eckigen Klammern die Gesamtzahl der Ringglieder und danach Art und Zahl der Heteroatome an.

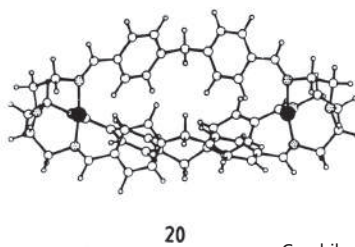
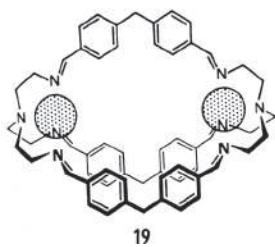
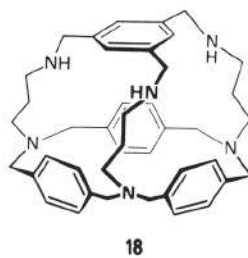
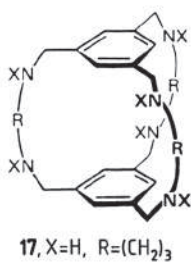
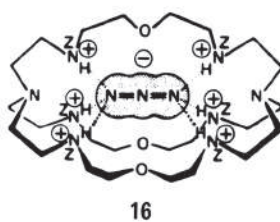
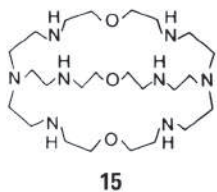
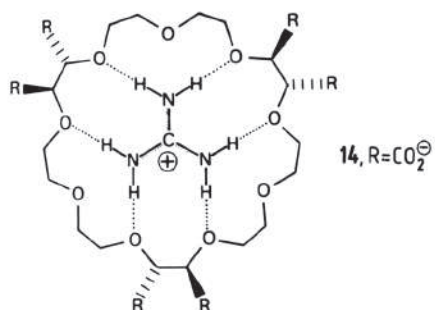
wirkung zwischen Nicotinamid und Tryptophan.^[45] Folglich könnte man an **12** auch Aminosäurereste anbringen, was zu »Parallelpeptiden«^[44] wie **12c** führen würde. Entsprechendes ließe sich mit Nucleinsäurebasen und Nucleosiden, Sacchariden etc. durchführen.

Durch Koordination in zweiter Sphäre, genauer gesagt durch Bindung von Metallammin-Komplexen $[M(NH_3)_n]^{m+}$ an makrocyclische Polyether über $N-H\cdots O$ -Wechselwirkungen mit den NH_3 -Gruppen ergeben sich verschiedene supramolekulare Spezies (»Überkomplexe«).^[46] Es ist anzunehmen, dass Metallammin-Komplexe – wie $R-NH_3^+$ (siehe **13**) – auch von Oxaaza- und Polyaza-Makrocyclen gebunden werden. Starke Komplexierung durch Makrocyclen mit negativ geladenen Seitengruppen wie **12b** oder den Hexacarboxylat-Ligand von **14**^[47] sollte verschiedene Vorgänge zwischen dem zentral gebundenen Metallammin-Komplex und den lateralen Gruppen auslösen können (Energie- und Elektronentransfer, chemische Reaktionen usw.).

Rezeptoren für sekundäre und tertiäre Ammonium-Ionen sind ebenso von Interesse. $R_2NH_2^+$ -Ionen werden vom Makrocyclus [**12**]- N_2O_2 über zwei Wasserstoffbrückenbindungen koordiniert.^[48] Auf die Bindung von quartären Ammonium-Ionen wird in Abschnitt 4.3 eingegangen. Das Guanidinium-Ion wird von [**27**]- O_9 -Makrocyclen über sechs $^+N-H\cdots O$ -Bindungen komplexiert, wobei sich der besonders stabile Komplex **14** mit einem Hexacarboxylat-Rezeptor ergibt; dieser bindet auch das Imidazolium-Ion.^[49a]

3. Anionen-Koordinationschemie und die Erkennung anionischer Substrate

Obwohl anionische Spezies in Chemie und Biologie eine wichtige Rolle spielen, blieb ihre Rezeptorchemie lange unbeachtet, während die Komplexierung von Metall-Ionen und neuerdings von Molekül-Kationen ausgiebig erforscht wurde. Von der Anionen-Koordinationschemie konnte eine große Zahl neuartiger Strukturen mit chemisch und biologisch wichtigen Eigenschaften erwartet werden.^[2, 6, 32] Es war deshalb eine Herausforderung, Rezeptoren für Anionen und Bindungselemente für anionische funktionelle Gruppen zu ersinnen. Das Gebiet erfreute sich in den letzten Jahren zunehmender Attraktivität, und allmählich nimmt die Anionen-Koordinationschemie Formen an.^[8, 9, 50]



Graphiken 14-20

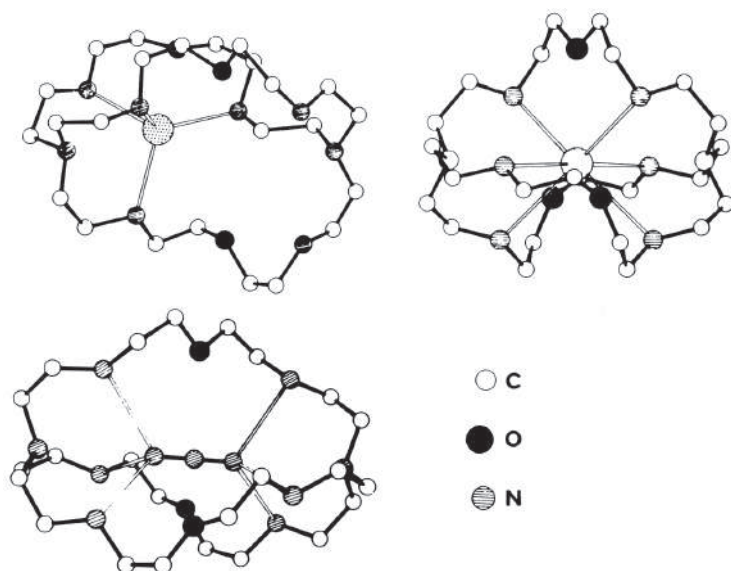


Abbildung 2: Strukturen der Anion-Cryptate des sechsfach protonierten Rezeptors $15\text{-}6\text{H}^+$ mit Fluorid- (oben links), Chlorid- (oben rechts) und Azid-Ionen (unten).^[51b]

Für die Bindung anionischer Substrate sind positiv geladene oder neutrale Gruppen mit Elektronenmangel nötig. Hauptsächlich sind Ammonium- und Guanidinium-Einheiten, die $^+\text{N-H}\cdots\text{X}^-$ -Bindungen ausbilden, verwendet worden, jedoch sind auch Wechselwirkungen zwischen Anionen und neutralen Wasserstoffdonoren (z.B. CONH- oder COOH-Funktionen), Zentren mit Elektronenmangel (Bor, Zinn usw.) oder Metall-Ionen möglich.

Polyammonium-Makrocyclen und -Makropolycyclen sind als Rezeptoren für Anionen am ausführlichsten untersucht worden. Sie bilden mit einer Vielzahl anionischer Spezies (anorganischen Anionen, Carboxylaten, Phosphaten usw.) selektiv stabile Komplexe, wobei Stabilität und Selektivität sowohl von elektrostatischen als auch von strukturellen Effekten herrühren. Stabile Komplexe der sphärischen Halogenid-Ionen werden mit hoher Selektivität von den makrobicyclischen und den sphärischen makrotricyclischen Rezeptoren wie den protonierten Formen von **5**^[32] (siehe 8), Bis-tren **15**^[51] und verwandten Verbindungen gebildet.^[50, 52]

Die hexaprotonierte Form von Bis-tren, $15\text{-}6\text{H}^+$, komplexiert ein- und mehratomige Anionen.^[51] Die Kristallstrukturen dreier derartiger Anion-Cryptate (Abb. 2) veranschaulichen die verschiedenen Möglichkeiten der Anionen-Koordination mit diesem Rezeptor.^[51a] Die sphärischen Halogenid-Ionen sind nicht komplementär zu dem ellipsoidalen Rezeptorhohlraum und führen deshalb zu einer Verzerrung der Struktur: F^- ist in einer tetraedrischen Anordnung von $^+\text{N-H}\cdots\text{F}^-$ -Bindungen fixiert, Cl^- und Br^- weisen oktaedrische Koordination auf; das lineare dreiatomige Anion NF_3 dagegen passt exakt nach Form und Größe in den Hohlraum von $15\text{-}6\text{H}^+$. Es wird im Hohlraum durch eine pyramidale Anordnung von je drei Wasserstoffbrückenbindungen zu den beiden endständigen Stickstoffatomen festgehalten, wodurch das Cryptat $[\text{N}_3^+ \subset (15\text{-}6\text{H}^+)]^{16}$ entsteht (siehe Abb. 2 unten). Somit ist $15\text{-}6\text{H}^+$ ein Rezeptor für lineare dreiatomige Anionen wie N_3^+ , das tatsächlich viel fester gebunden wird als andere einfach geladene Anionen.

Carboxylate und Phosphate bilden mit Polyammonium-Makrocyclen Komplexe, deren Stabilitäten (und die Selektivitäten der Bildung) von Struktur und Ladung der beiden Partner bestimmt werden.^[50, 51, 53-57] Rezeptoren für diese funktionellen Gruppen sind von besonderem Interesse, da sie die »Anker« zahlreicher biologischer Substrate sind. Eine starke Bindung derartiger Anionen sollte durch makrobicyclische Polyammonium-»Taschen« möglich sein, wobei die Carboxylat- (Formiat, Acetat, Oxalat usw.) und Phosphat-Gruppen mit mehreren Ammonium-Gruppen wechselwirken.^[51] Die Guanidinium-Gruppe, die in biologischen Rezeptoren als Bindungsstelle auftritt, kann zu Carboxylat- und Phosphat-Gruppen jeweils zwei Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden. Sie ist in acyclische^[58] und makrocyclische^[59] Strukturen eingebaut worden. Rezeptoren, die die Bindungseigenschaften von Vancomycin haben, sind in Arbeit.^[60]

Komplexanionen von Übergangsmetallen wie Hexacyanometallate $[\text{M}(\text{CN})_6]^{n-}$ können ebenfalls – durch Koordination in zweiter Sphäre – komplexiert werden; dabei entstehen Überkomplexe,^[53a] in denen die elektronischen^[61, 62] und photochemischen^[63] Eigenschaften des Übergangsmetallkomplexes deutlich verändert sind. Von besonderem Interesse ist die starke Bindung von Adenosinmono-, -di- und -triphosphat (AMP, ADP bzw. ATP) sowie von verwandten Verbindungen, die eine sehr wichtige biologische Rolle spielen.^[55-57]

Kaskadenartige Komplexierung^[64] von anionischen Spezies liegt vor, wenn ein Ligand zuerst Metall-Ionen bindet, die dann mit Anionen

wechselwirken. Solche Vorgänge kommen z.B. in lipophilen Kation/Anion-Paaren^[65] und bei den Cu^{II}-Komplexen von Bis-tren **15** sowie von makrocyclischen Polyaminen^[66] vor.

Heterokern-NMR-Studien geben Auskunft über die elektronischen Effekte, die durch Anionen-Komplexierung verursacht werden; derartige Untersuchungen wurden an Chlorid-Cryptaten durchgeführt.^[67]

Über die Komplexierung von anionischen Molekülen durch andere Typen makrocyclischer Liganden, insbesondere durch cyclophanartige Verbindungen, ist berichtet worden.^[50] Zwei derartige Rezeptoren sind die protonierten Formen der Makropolycyclen **17**^[68] und **18**^[69].

Bei der Koordinationschemie von Anionen wurden also in den letzten Jahren sehr große Fortschritte erzielt. Durch Entwicklung weiterer Rezeptoren mit gut definierten Geometrien und Bindungseigenschaften durfte es möglich sein, eine noch bessere Erkennung von Anionen zu erreichen, wobei hochselektiv sehr stabile Anionenkomplexe mit charakteristischen Koordinationsmustern gebildet werden sollten. Theoretische Untersuchungen sind für die Planung von Anionen-Rezeptoren und bei der *A-priori*-Abschätzung von Bindungseigenschaften eine sehr große Hilfe, wie kürzlich die Berechnung der relativen Affinität von 5-4H⁺ zu Chlorid- und Bromid-Ionen demonstrierte.^[70]

4. Corezeptoren und Mehrfacherkennung

Hat man einmal Rezeptoren für bestimmte Gruppen, liegt es nahe, mehrere dieser Rezeptoren in einer makropolycyclischen Struktur zu vereinen. Auf diese Weise entstehen polytope Corezeptoren mit mehreren bindenden Untereinheiten, die kooperativ entweder gleichzeitig mehrere Substrate oder polyfunktionelle Spezies mehrfach (polyhapto) komplexieren können. Durch Abwandlung sollten sich Cokatalysatoren oder Cocarrier ergeben, mit denen das gebundene Substrat (oder die Substrate) umgesetzt bzw. transportiert werden kann. Wegen ihrer Fähigkeit zur Mehrfacherkennung und der Effekte bei der Besetzung von Bindungsstellen bieten die Corezeptoren darüber hinaus einen Zugang zu höheren Formen molekularen Verhaltens wie Kooperativität, Allosterie, Regulation sowie Kommunikation und Signalübertragung. Grundideen und Definitionen im Zusammenhang mit Corezeptoren sind an anderer Stelle ausführlich dargelegt worden.^[7]

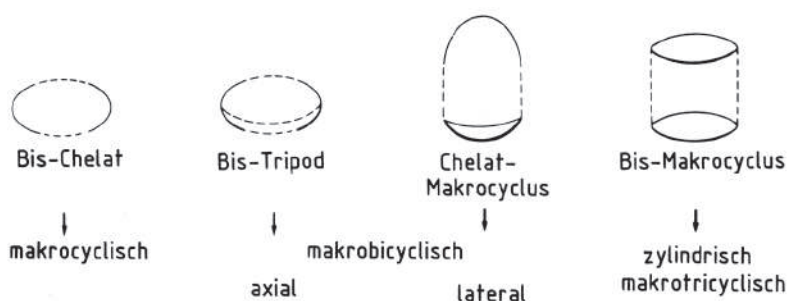


Abbildung 3: Verschiedene Typen ditoper Corezeptoren mit chelatisierenden, tripodalen und makrocyclischen Struktureinheiten.

Die einfachste Klasse von Corezeptoren sind jene Verbindungen, die über zwei Bindungseinheiten verfügen: ditope Corezeptoren. Die Untereinheiten können zu unterschiedlichen Strukturtypen gehören. Durch Kombination von chelatisierenden tripodalen und makrocyclischen Bauelementen ergeben sich makrocyclische, axiale oder laterale makrobicyclische sowie zylindrisch-makrotricyclische Strukturen (Abb. 3). Je nachdem, welche Baueinheiten zusammengefügt werden, können die Corezeptoren Metall-Ionen, organische Moleküle oder beide zugleich binden.

4.1 Zwei- und mehrkernige Cryptate

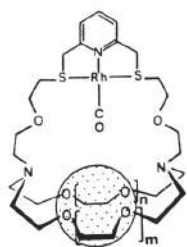
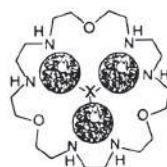
Corezeptoren mit zwei oder mehr Bindungseinheiten für Metall-Ionen bilden zwei- bzw. mehrkernige Cryptate, wobei die makropolycyclische Struktur die Anordnung der Metall-Ionen festlegt. Solche Komplexe können interessante neue Eigenschaften haben, die auf Wechselwirkungen zwischen Kationen, elektrochemischen und photochemischen Vorgängen, Fixierung von brückenbildenden Substraten usw. beruhen und so für bioanorganische Modelluntersuchungen sowie für Mehrzentren-Mehrelektronen-Reaktionen und -Katalysen genutzt werden. Von Rezeptoren aller Strukturtypen, die in Abbildung 3 aufgeführt sind, könnten zweikernige Cryptate erhalten werden. Dieses umfangreiche Gebiet wird hier lediglich anhand von einigen neueren Beispielen veranschaulicht; genauere Angaben und Literaturhinweise finden sich in früheren Übersichten.^[64, 71]

Axiale makrobicyclische Liganden führen zu zweikernigen Cryptaten wie dem Cu^{I}_2 -Komplex 19, dessen Rezeptor eine großräumige Hexaimin-Struktur ist, die durch eine einstufige Mehrfachkondensation erhalten wurde. Die Struktur des Komplexes im Kristall zeigt 20.^[72] Laterale Makrobicyklen haben einen unsymmetrischen Aufbau und ermöglichen es, unterschiedliche Metall-Ionen im gleichen Komplex unterzubringen. So ist in Komplexen vom Typ 21 ein Redoxzentrum mit einem Lewis-Säure-Zentrum zusammengebracht, wodurch ein weiteres gebundenes Substrat aktiviert werden kann.^[73] Durch Zusammenbringen von Metall-Ionen und verbrückenden Spezies im Hohlraum des polytopen Rezeptors können Cluster-Cryptate entstehen. Zum Beispiel ist im Cu^{II}_3 -Komplex 22 (Struktur im Kristall: 23) eine Bis- μ_3 -hydroxo-tris-kupfer(II)-Gruppierung im Hohlraum eines tritopen Makrocyclus gebunden.^[74] Von der Möglichkeit des Einschlusses in den Hohlraum eines Makrocyclus konnte man auch beim Nachbauen von biologischen Eisen-Schwefel-Clustern Gebrauch machen.^[75] Dieser anorganische Aspekt von supramolekularen Spezies lässt ein eigenes Forschungsgebiet erahnen, auf dem es noch viele neuartige Strukturen und Reaktivitäten zu entdecken gibt.

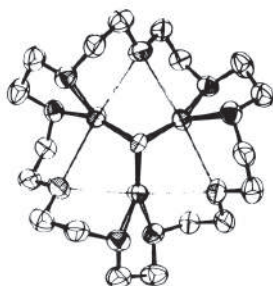
4.2 Erkennung linearer Substrate durch ditope Corezeptoren

Rezeptoren, die über zwei Bindungseinheiten an gegenüberliegenden Stellen ihrer Struktur verfügen, werden vorzugsweise solche Substrate komplexieren, die zwei passende funktionelle Gruppen in einem Abstand aufweisen, der mit der Distanz zwischen den Bindungseinheiten verträglich ist oder gar mit ihr übereinstimmt. Die Komplementarität im Abstand läuft auf eine Erkennung der Moleküllänge des Substrats durch den Rezeptor hinaus (lineare Erkennung). Diese Art der molekularen Erkennung linearer dikationischer und dianionischer Substrate ist in 24 bzw. 25 skizziert.

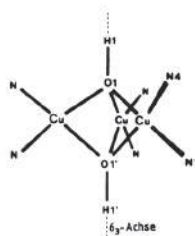
Durch Einfügen makrocyclischer Baueinheiten, die NH_3^+ -Gruppen binden (siehe Abschnitt 2.5), in zylindrische makrotricyclische^[76] und makrotetracyclische^[77] Strukturen entstehen ditope Corezeptoren. Sie bilden mit endständigen Diammonium-Ionen $^+\text{H}_3\text{N}-(\text{CH}_2)_n-\text{NH}_3^+$ Cryptate wie 26. In den resultierenden Übermolekülen befindet sich das Substrat im zentralen Hohlraum des Rezeptormoleküls, wo es über die zwei NH_3^+ -Gruppen an den makrocyclischen Bindungsstellen verankert ist, wie die Struktur von 27 (26 mit $\text{R} = \text{NA}$ und $\text{A} = (\text{CH}_2)_5$) im


 21, $m, n=0,1$


22



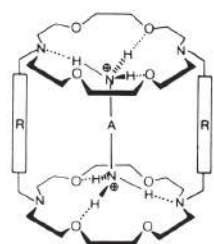
23



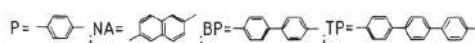
24



25


 26, $R=P, NA, BP, TP$


27



Graphik 21-27

Kristall zeigt.^[78] Beim Verändern der Brücken R in 26 verschiebt sich die Bindungsselektivität zugunsten des Substrats mit der komplementären Länge. NMR-Relaxationsmessungen ergaben, dass optimale Partner in einem Rezeptor/Substrat-Paar ähnliche molekulare Bewegungen ausführen. Komplementarität in der supramolekularen Spezies bedeutet daher, dass sowohl die sterischen als auch die dynamischen Verhältnisse stimmen.^[79]

Dianionische Substrate, beispielsweise die Dicarboxylate $^{-}\text{O}_2\text{C}-(\text{CH}_2)_n-\text{CO}_2^{-}$, werden von ditopen Makrocyclen wie 28 längenselektiv gebunden. Diese Rezeptoren enthalten zwei Triammonium-Gruppen als Bindungseinheiten, die, wie in 29 schematisch gezeigt, mit den endständigen Carboxylat-Funktionen wechselwirken.^[80]

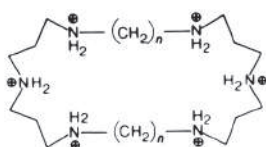
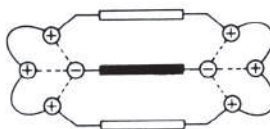
Selektive Bindung durch passende Rezeptoren ist also sowohl bei Substraten mit zwei endständigen Ammonium- als auch bei solchen mit zwei Carboxylat-Gruppen möglich, wobei die Selektion auf einer Längenerkennung beruht. Auch für wichtige biologische Spezies wie Polyamine, Aminosäuren und Peptiddiamine sowie -dicarboxylate sollten sich selektive Rezeptoren finden lassen.

Hinsichtlich der Art der Bindungseinheiten und der Brücken zwischen ihnen kann man sich zahlreiche Variationen vorstellen, und es sollte möglich sein, die Komplexierungseigenschaften von Rezeptoren maßzuschneidern (siehe z.B. [15, 81]). Die Entwicklung von heterotopen Rezeptoren dürfte es ermöglichen, Ionenpaare^[82] oder zwitterionische Spezies^[83] zu komplexieren.

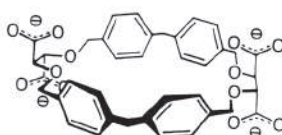
Von großem Interesse sind Untersuchungen zur Dynamik von Übermolekülen.^[79, 84] Die dynamischen Eigenschaften hängen mit der konformativen Beweglichkeit von Rezeptor- und Substratmolekül zusammen und sind für die molekulare Erkennung ebenso wichtig wie strukturelle Aspekte.

4.3 Heterotope Corezeptoren – Speleanden und amphiphile Rezeptoren

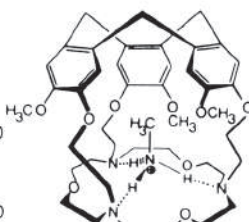
Die Kombination verschiedenartiger Bindungseinheiten ergibt heterotope Rezeptoren, die gleichzeitig Substrate über kationische, anionische und/oder neutrale Stellen binden können. Dabei wird von elektrostatischen und Van-der-Waals-Kräften sowie von solvophoben Effekten Gebrauch gemacht. Die natürlichen Cyclodextrine waren die ersten Rezeptoren, deren Bindungsverhalten gegenüber organischen Mole-

28, $n=7,10$ 

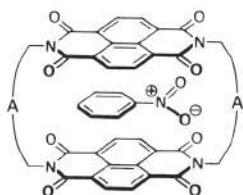
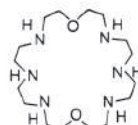
29



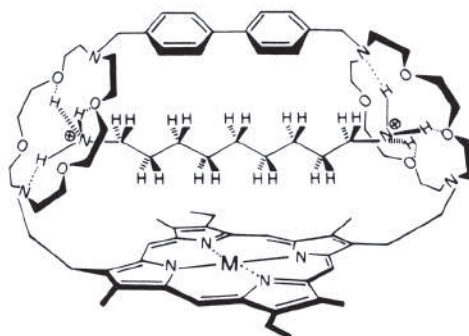
30



31

32, $A=(CH_2)_8$ 

33

34, $M=Zn$

Graphik 28-34

külen intensiv untersucht wurde; dies erbrachte eine Fülle von Ergebnissen über physikalische und chemische Eigenschaften von Molekülkomplexen.^[21, 85]

In den letzten Jahren sind zahlreiche Typen synthetischer makrocyclischer Rezeptoren entwickelt worden, die verschiedenartige organische Gruppen und polare Funktionen enthalten und sowohl geladene als auch ungeladene organische Substrate komplexieren. Obwohl die Ergebnisse viel häufiger auf bloße Bindung denn wirkliche Erkennung hinweisen, wurde doch eine Fülle von Daten verfügbar, aus denen die Grundzüge der Molekülkomplexierung und die Eigenschaften von Strukturbestandteilen deutlich werden, die für eine Planung von Rezeptoren notwendig sind. Wir berichten hier vorwiegend über eigene Ergebnisse auf diesem Gebiet. Im übrigen sei der Leser auf spezielle Übersichten zu diesem Thema hingewiesen.^[20, 86]

In amphiphilen Rezeptoren, die über geladene, polare Bindungsstellen und unpolare organische Reste verfügen, kann es zu einer Synergie von elektrostatischen und hydrophoben Effekten kommen. Die organischen Reste schirmen die polaren Stellen vor Solvation ab und erhöhen die elektrostatischen Kräfte. Derartige makropolycyclische Strukturen mit polaren Bindungseinheiten und schützenden apolaren Strukturbestandteilen werden als Speleanden bezeichnet. Substratbindung führt zu Speleaten.^[87]

So bildet der Makrocyclus **30**, der vier Carboxylat-Gruppen und zwei Diphenylmethan-Einheiten^[88] enthält, nicht nur sehr stabile Komplexe mit primären Ammonium-Ionen, sondern auch mit sekundären, tertiären und quartären Ammonium-Substraten. Insbesondere komplexiert er Acetylcholin, was Aufschluss über die Art der Wechselwirkungen gibt, die in biologischen Acetylcholin-Rezeptoren eine Rolle spielen dürften, z.B. die Verknüpfung von negativen Ladungen mit hydrophoben Barrieren. Ähnliche Effekte sind in anionischen Rezeptoren wirksam, die quartäre Ammonium-Ionen komplexieren.^[86a, 89] Intensiv untersucht wurde auch die Komplexbildung von makrocyclischen Polyether-Rezeptoren mit heterocyclischen Ammonium-Ionen wie Diquat.^[90] Das CH_3NH_3^+ -Ion bildet ein selektives Speleat **31** durch Koordination an die $[\text{18}]\text{-N}_3\text{O}_3$ -Baueinheit eines makropolycyclischen Ringsystems, das durch ein Cyclotrimeratrylen-Strukturelement gestützt wird. In den engen Hohlraum passen größere Substrate nicht hinein.^[87, 91]

Amphiphilartige Bindung tritt auch bei molekularen anionischen Substraten auf.^[20, 86, 92] Geladene heterocyclische Einheiten, die sich z.B. von der Pyridinium-Gruppe ableiten, bieten einen Weg, um gleichzeitig elektrostatische Wechselwirkungen und hydrophobe Effekte sowie eine gewisse Starrheit in ein Rezeptormolekül einzubringen; darüber hinaus können sie elektro- und photoaktiv sein.^[93] Selbst einfache planare Einheiten wie Diazapyren-Dikationen binden flächige organische Anionen in wässriger Lösung bemerkenswert gut, wofür elektrostatische und hydrophobe Wechselwirkungen (Stapelung) ausschlaggebend sind.^[93] Auch ein Makrocyclus mit vier Pyridinium-Einheiten, der organische Anionen stark komplexiert, wurde synthetisiert.^[94]

Rezeptoren vom Cyclointercaland-Typ, die intercalierende Einheiten in einem makrocyclischen System enthalten, sind für die Bindung von kleinen Molekülen sowie wegen ihrer (selektiven) Wechselwirkung mit Nucleinsäuren von Interesse. Von einem Cyclo-bis-intercaland wurde das Cryptat 32 erhalten, bei dem ein Nitrobenzol-Molekül zwischen zwei planare Baueinheiten (Intercalanden) des Rezeptors eingeschoben ist.^[95] Solche Rezeptoren sind für die Erkennung von flachen Substraten gut geeignet. Komplexe mit intercalierenden Farbstoffen sollten besonders interessant sein.^[96] Wird das Polyamin 33 mit 9-Aminoacridin-Gruppen über Seitenketten ausgestattet, so ergibt sich ein Corezeptor, der Anionenbindung sowohl durch die Polyammonium-Teilstruktur als auch durch Stapelwechselwirkungen über die Farbstoff-Einheiten ermöglichen sollte. Der Rezeptor bindet ATP, wobei Wechselwirkungen mit dem Triphosphat- und dem Adeninrest wirksam sind; zusätzlich ist ein Zentrum für die katalytische Hydrolyse vorhanden (siehe Abschnitt 5.2).^[97]

Flache aromatische, heterocyclische Einheiten mit lateralen aciden Gruppen und Amidfunktionen fungieren als Rezeptoren, die komplementäre Substrate in einer molekularen Spalte über Größe und Form erkennen.^[17b] Rezeptoren, die heterocyclische Gruppen wie 2,6-Diaminopyridin^[98a] oder eine Nucleinsäurebase und einen Intercalator^[98b] enthalten, könnten via Basenpaarung die Erkennung von Nucleotiden ermöglichen.^[98c] Sphärische Cryptophane bieten die Möglichkeit, die molekulare Erkennung zwischen neutralen Rezeptoren und Substraten zu untersuchen, insbesondere den Zusammenhang zwischen der Komplementarität bezüglich Molekülgestalt und -volumen sowie der Selektivität.^[99]

4.4 Mehrfacherkennung in Metallorezeptoren

Metallorezeptoren sind heterotope Corezeptoren, die durch substratspezifische Einheiten sowohl Metall-Ionen als auch organische Moleküle binden können. Für die Bindung von Metall-Ionen sind Porphyrin- und α,α' -Bipyridin(bpy)-Gruppen in makrocyclische Corezeptoren eingeführt worden, die auch Bindungsstellen zur Verankerung von NH_3^+ -Gruppen enthalten.^[64, 71, 100] Diese Rezeptoren bilden durch gleichzeitige Bindung von Metall-Ionen und Diammonium-Ionen Mischsubstrat-Übermoleküle wie **34**. Metallorezeptoren und die zugehörigen Übermoleküle eröffnen somit zahllose Möglichkeiten, um Wechselwirkungen und Reaktionen zwischen gleichzeitig gebundenen organischen und anorganischen Spezies zu studieren.

Angesichts der Vielzahl bekannter Metallkomplexe und möglicher molekularer Substrate sind zahlreiche Typen von Metallorezeptoren vorstellbar, die eine interessante Chemie zeigen sollten und als bio-anorganische Modellsysteme Verwendung finden könnten.^[101]

5. Supramolekulare Reaktivität und Katalyse

Reaktivität und Katalysatoreigenschaften sind wichtige Charakteristika supramolekularer Systeme. Molekulare Rezeptoren mit Bindungsstellen und reaktiven Gruppen können geeignet sein, ein Substrat (mit einer bestimmten Selektivität und Geschwindigkeit) zu komplexieren und mit ihm (mit bestimmter Geschwindigkeit, Selektivität und Wechselzahl) zu reagieren; die Produkte könnten dann freigesetzt und ein neuer Zyklus begonnen werden (Abb. 4).

Supramolekulare Reaktivität und Katalyse sind demnach mit zwei wichtigen Schritten verknüpft: selektive Bindung des Substrats und Transformation der gebundenen Spezies zu Produkten im Übermolekül. Beide Schritte erfordern die richtige molekulare Information im Reaktivrezeptor.^[1] Anders als bei der molekularen Katalyse ist ein Bindungsschritt beteiligt, der das Substrat auswählt und der Reaktion vorausgeht.

Durch Planung von wirksamen und selektiven supramolekularen Reagentien und Katalysatoren können Einblicke in die grundlegenden Schritte der Katalyse gewonnen werden. Außerdem können neue Typen von chemischen Reagentien erschlossen und Reaktionen ermöglicht wer-

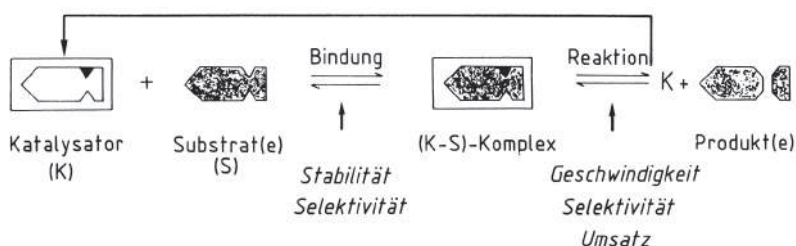


Abbildung 4: Schematische Darstellung der supramolekularen Katalyse.

den, die für die enzymatische Katalyse wichtige Faktoren aufdecken. Dies stimulierte zahlreiche Untersuchungen, bei denen hauptsächlich Reagentien auf der Basis funktionalisierter α -Cyclodextrine, makrocyclischer Polyether und Cyclophane verwendet wurden.^[85, 102, 103]

5.1 Katalyse durch Reaktivrezeptoren für Kationen

Bei Modellstudien von Enzymreaktionen sind Esterspaltungen am häufigsten untersucht worden. Makrocyclische Polyether mit Mercapto-Gruppen in Seitenketten spalten aktivierte Ester mit deutlich erhöhter Reaktionsgeschwindigkeit und enantioselektiv.^[104-106] Das Tetra-L-Cysteinylderivat von **12c** komplexiert *p*-Nitrophenyl(PNP)-Ester von Aminosäuren und Peptiden und reagiert mit der gebundenen Spezies; dabei wird *p*-Nitrophenol freigesetzt (siehe **35**).^[105] Die Reaktion zeigt 1. Substratelektivität mit 2. deutlich höherer Reaktionsgeschwindigkeit bei Dipeptidestern, 3. Hemmung durch komplexierbare Metall-Ionen, die das gebundene Substrat verdrängen, 4. hohe Enantioselektivität bei Dipeptidestern und 5. langsame, aber eindeutige Katalyse.

Durch Komplexierung von Pyridinium-Substraten an einen Makrocyclen vom Typ **12c**, der mit 1,4-Dihydropyridyl-Seitenketten ausgestattet ist, ergibt sich eine Geschwindigkeitserhöhung bei der Wasserstoffübertragung von der Dihydropyridyl- zur Pyridinium-Gruppe (siehe **36**). Bei Verdrängung des gebundenen Substrats durch ein komplexierbares Kation wird die Intrakomplex-Reaktion erster Ordnung inhibiert und geht in eine bimolekulare Reaktion über.^[107]

Aktivierung und Orientierung durch Komplexbildung wurde für die Hydrolyse von O-Acetylhydroxylamin beobachtet. $\text{CH}_3\text{COONH}_3^+$ bildet einen so starken Komplex mit dem makrocyclischen Tetracarb-

oxylat **12b**, dass es sogar bei neutralem pH trotz des niedrigen pK_a -Wertes der freien Spezies (ca. 2.15) protoniert und gebunden bleibt.

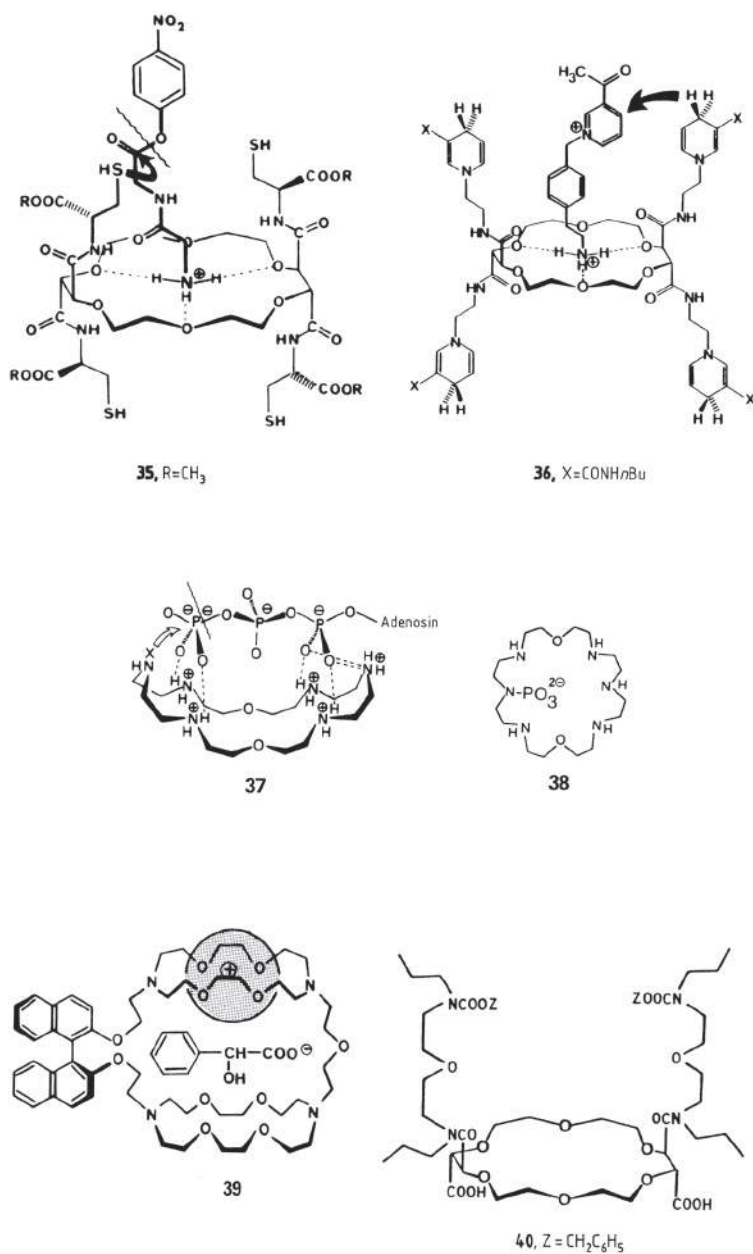
Infolgedessen ist seine Hydrolyse, die ausschließlich Acetat und Hydroxylamin ergibt, beschleunigt. In Gegenwart von K^+ -Ionen, die das Substrat verdrängen, entsteht durch Umlagerung Acetylhydroxamsäure $CH_3CONH-OH$ (ca. 50 %).^[108] Demnach kann starke Bindung allein schon ausreichend sein, um eine deutliche Beschleunigung einer Reaktion zu erreichen und um ihren Verlauf zu beeinflussen – ein Ergebnis, das auch für die Enzymkatalyse Bedeutung hat.

5.2 Katalyse durch Reaktivrezeptoren für Anionen

Die Entwicklung einer Anionen-Koordinationschemie und von Anionen-Rezeptoren ermöglichte die Untersuchung der Katalyse an chemisch und biochemisch interessanten anionischen Substraten wie ATP. Die Hydrolyse von ATP wird durch eine Reihe von protonierten makrocyclischen Polyaminen katalysiert. Insbesondere **[24]-N₆O₂ 33** bindet ATP stark und führt über einen weiten pH-Bereich zu einer deutlichen Beschleunigung der Hydrolyse zu ADP und anorganischem Phosphat.^[55, 109] Die Reaktion ist erster Ordnung und verläuft katalytisch. Zunächst wird ein Komplex zwischen ATP und protoniertem **33** gebildet; anschließend tritt eine Intrakomplex-Reaktion ein, an der wahrscheinlich eine saure, eine elektrostatische und eine nucleophile Katalyse beteiligt sind. Die Struktur **37** zeigt nur eine der möglichen Bindungsarten für den ATP-**33**-Komplex und deutet an, wie die Spaltung der endständigen Phosphoryl-Gruppe stattfinden könnte. Durch Phosphorylierung des Makrocyclus mit ATP wird ein kurzlebiges Intermediat gebildet, das als Phosphoramidat **38** identifiziert wurde und das sofort hydrolysiert wird. Untersuchungen mit Analoga von ATP weisen auf einen dissoziativen Mechanismus mit prä-assoziativem Charakter hin, der sich aus der Rezeptor/Substrat-Bindung ergibt.^[110] Bei diesem Vorgang zeigt der Katalysator **33** prototypische ATPase-Aktivität. d.h. er verhält sich wie eine Proto-ATPase.

5.3 Cokatalyse: Katalyse von Synthesereaktionen

Der nächste Schritt war, Systeme zu planen, die Bindungsknüpfung statt Bindungsspaltung ermöglichen, d.h. eher Aufbau- als Abbaureaktionen bewirken. Dafür ist wichtig, dass mehrere bindende und reaktive



Graphik 35-40

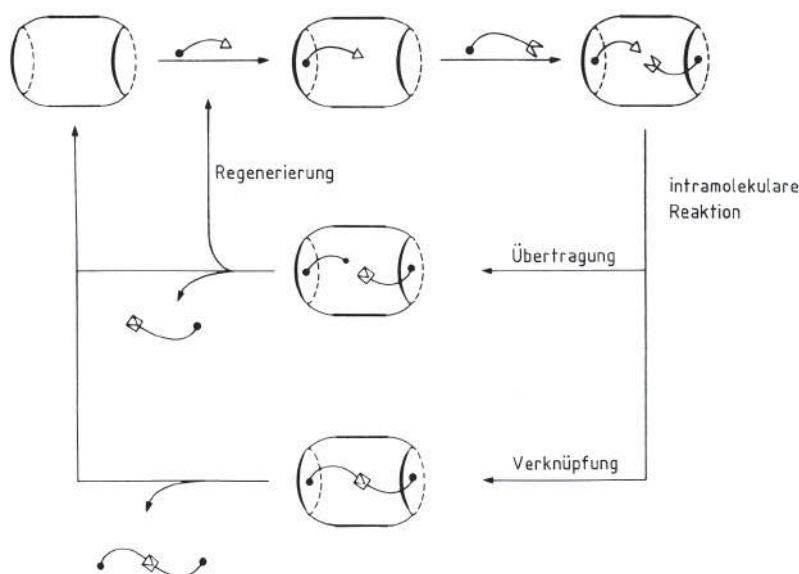


Abbildung 5: Schematische Darstellung von Cokatalysevorgängen: Gruppenübertragungs- und Verknüpfungsreaktionen erfolgen im supramolekularen Komplex, der durch Bindung von Substraten an die beiden makrocyclischen Baueinheiten eines makrotricyclischen Corezeptormoleküls entsteht.

Gruppen im Rezeptor vorhanden sind, was für Corezeptoren zutrifft.^[7] Mit ihnen sollte eine Cokatalyse möglich sein, indem sie Substrat(e) und Cofaktor(en) zusammenbringen und Reaktionen zwischen ihnen innerhalb des Übermoleküls vermitteln (Abb. 5). Ein derartiger Vorgang ist kürzlich verwirklicht worden.^[111]

Wenn der Makrocyclus 33, der bei den Untersuchungen der ATP-Hydrolyse verwendet wurde, als Katalysator für die Hydrolyse von Acetylphosphat ($\text{AcP} = \text{CH}_3\text{COOPO}_3^{2-}$) eingesetzt wird, findet man in der Tat, dass 33 die Synthese von Pyrophosphat aus AcP vermittelt. Der Substratverbrauch wird beschleunigt, und die Reaktion verläuft katalytisch. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit folgendem Katalysezyklus überein: 1. Bindung des Substrats AcP durch den protonierten Makrocyclus 33; 2. Phosphorylierung von 33 im supramolekularen Komplex, wodurch sich das phosphorylierte Intermediat PN 38 ergibt; 3. Bindung des Substrats HPO_4^{2-} (P); 4. Übertragung der Phosphoryl-

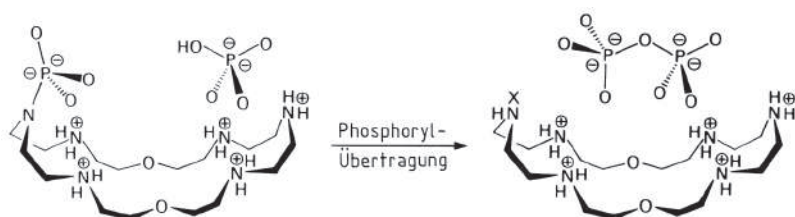


Abbildung 6: Cokatalyse: Pyrophosphatsynthese durch Phosphorylübertragung mit dem Makrocyclus 33 als Vermittler. Die Reaktion verläuft über die phosphorylierte Zwischenstufe 38.

Gruppe von PN auf P unter Bildung von Pyrophosphat PP (Abb. 6); 5. Freisetzung des Produktes und des Katalysators für einen neuen Cyclus. Dass 33 ein ditoper Corezeptor mit zwei Diethylentriamin-Einheiten ist, ist sowohl für die Bildung von PN wie von PP von besonderer Bedeutung. Die beiden Baueinheiten dürften so zusammenwirken, dass sie über die Ammonium-Gruppen AcP binden und es für die Übertragung der Phosphoryl-Gruppe aktivieren, ein unprotoniertes Stickstoffatom für die Bildung von PN bereitstellen sowie den Phosphoryl-Transfer von PN auf P vermitteln. Somit würde 33 in einer strukturell genau festgelegten Anordnung eine elektrostatische und eine nucleophile Katalyse, die für die Synthese von PP über zwei aufeinanderfolgende Phosphoryl-Übertragungen notwendig ist, ermöglichen. Der Katalysator entfaltet dabei eine protokinase-ähnliche Aktivität (Abb. 6). Bei dieser Bindungsknüpfung ist die supramolekulare Reaktivität um die Cokatalyse erweitert, die Synthesereaktionen im supramolekularen Komplex vermittelt. Über die Hydrolyse von ATP durch 33 in Gegenwart zweiwertiger Metall-Ionen, bei der PP entsteht, ist ebenfalls berichtet worden.^[112]

Funktionalisierte makrocyclische Polyether sind in zwei aufeinanderfolgenden Intrakomplex-Reaktionen zur Knüpfung von Peptidbindungen eingesetzt worden.^[113] Mit einem makrobicyclischen Cyclophan, das eine Thiazolium-Gruppe enthält, gelang kürzlich eine supramolekulare Katalyse der Benzoinkondensation von Benzaldehyd.^[114]

Die in diesem Abschnitt diskutierten Systeme haben die Eigenschaften, die supramolekulare Reaktivität und Katalyse kennzeichnen: Substraterkennung, Reaktion innerhalb des Übermoleküls, Steigerung der

Reaktionsgeschwindigkeit, Hemmung durch kompetitiv gebundene Spezies, Struktur- und Enantioselektivität, katalytischer Umsatz. Man kann sich noch eine ganze Reihe anderer Reaktionstypen vorstellen. So bereitet die supramolekulare Katalyse der Hydrolyse von nicht-aktivierten Estern und Amiden noch viele Probleme;^[115] natürliche enzymatische Reagentien stehen hierfür zur Verfügung, nicht jedoch abiotische Katalysatoren. Biochemische Wege zu künstlichen Katalysatoren sind z.B. die Modifikation von Enzymen durch chemische Umwandlung^[116] oder ortsspezifische Mutagenese (Protein-Engineering)^[117] sowie die Erzeugung katalytisch wirksamer Antikörper.^[118] Von besonderem Interesse ist die Entwicklung supramolekularer Katalysatoren für Synthesereaktionen. Aufgrund ihrer Möglichkeiten zur Mehrfachbindung sind Corezeptoren als Cokatalysatoren für Bindungsknüpfungen, metallkatalysierte Prozesse und Cofaktorreaktionen geeignet.

Supramolekulare Katalysatoren sind abiotische Reagentien, d.h. chemische Katalysatoren, welche die gleichen Gesamtvorgänge wie Enzyme ausführen können, ohne genau dem Weg zu folgen, der von den Enzymen eingeschlagen wird. Diese Chemie könnte hochwirksame und selektive Reagentien für Prozesse hervorbringen, die mit Enzymen nicht durchführbar sind und enzymatische Vorgänge unter Bedingungen ermöglichen, unter denen Enzyme nicht mehr funktionieren.

6. Transportvorgänge – Carrier- und Kanaldesign

Die Organische Chemie des Membrantransports – von Carriern und Kanälen – ist noch jung, obwohl die physikalisch-chemischen Eigenschaften und die biologische Bedeutung von Transportvorgängen schon lange bekannt sind. Durch Planung und Synthese von Rezeptoren, die organische und anorganische Substrate selektiv binden, sind eine Reihe von Verbindungen verfügbar geworden, die auch als Carrier verwendet werden können, wenn sie in Membranen löslich sind. Sie können selektiven Transport bewirken, indem sie Membranen für die gebundene Spezies durchlässig machen. Somit ist Transport, zusammen mit Erkennung und Katalyse, eine grundlegende Funktion von supramolekularen Spezies.^[2, 103, 119, 120] Die Chemie von Transportsystemen umfasst drei Hauptaspekte: Transportvorgänge zu ersinnen, transportwirksame

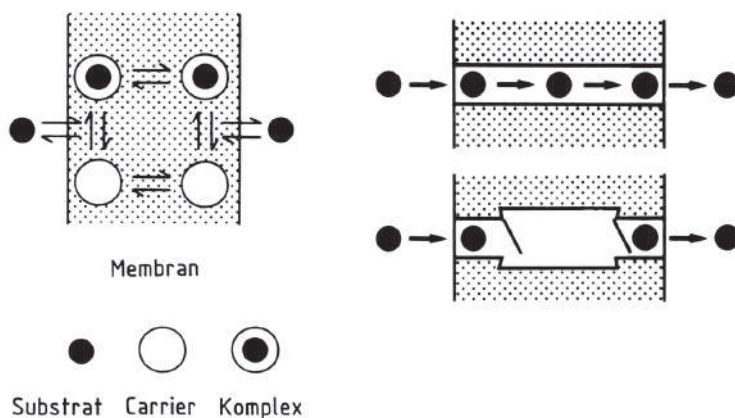


Abbildung 7: Links: Carriertransport, rechts: Kanal- (oben) und Gating-Kanaltransport (unten).

Systeme zu planen und ihre Anwendungsmöglichkeiten in Chemie und Biologie zu erforschen. Selektive Membrandurchlässigkeit kann entweder durch Carrier oder durch membrandurchdringende Kanäle bewirkt werden (Abb. 7).

6.1 Carrier-vermittelter Transport

Carrier-vermittelter Transport bedeutet Transport eines Substrats durch eine Membran, wobei Carriermoleküle den Transport erleichtern. Der vierstufige Cyclus – Assoziation, Dissoziation, Hin- und Rückdiffusion (Abb. 7) – kommt einer physikalischen Katalyse gleich, die eine Translokation des Substrats verursacht, so wie chemische Katalyse eine Transformation in Produkte bewirkt. Der Carrier entspricht einem Transportkatalysator und die aktive Spezies dem Carrier/Substrat-Übermolekül. Transport ist ein Dreiphasenvorgang, während homogene chemische Katalyse und Phasentransferkatalyse Ein- bzw. Zweiphasenvorgänge sind.

In der Organischen Chemie des Membrantransports ist Carrierdesign am wichtigsten, da der Carrier die Art des Substrats sowie die physikalisch-chemischen Eigenschaften (Geschwindigkeit, Selektivität) und die Art des Transports (erleichterte Diffusion, Kopplung an Gradienten und an den Fluss anderer Spezies, aktiver Transport) festlegt.

Der Carrier sollte nach Möglichkeit hochselektiv sein, hohe Austauschgeschwindigkeiten und eine passende Lipophilie/Hydrophilie-Balance aufweisen sowie funktionelle Gruppen tragen, die sich zur Kopplung an einen Substanzfluss eignen. Der Transportprozess ist auch abhängig von der Art der Membran, von den Konzentrationen der Substrate in den drei Phasen und von der Anwesenheit anderer Spezies. Ausführlichere Betrachtungen über diese inneren und äußeren Faktoren, die Transportvorgänge beeinflussen, sind in früheren Abhandlungen zu finden.^[1, 103, 120-122]

Bei unseren anfänglichen Arbeiten zum Transport von Aminosäuren, Dipeptiden und Acetylcholin durch eine flüssige Membran verwendeten wir einfache lipophile, tensidartige Carrier. Wir hatten dabei die physikalisch-organische Chemie von Transportvorgängen im Sinn und wollten Transport unter verschiedenen Gegebenheiten untersuchen, z.B. wenn dieser an einen Fluss von Protonen, Kationen oder Anionen über Konzentrations- und pH-Gradienten gekoppelt ist.^[123] Stimuliert durch die zahlreichen natürlichen und synthetischen Kationen-Rezeptoren, die als Kationen-Carrier fungieren können, stand der selektive Transport von Metall-Ionen, hauptsächlich von Alkalimetall-Kationen, zunächst im Mittelpunkt der Untersuchungen.^[24, 103, 119-124]

Cryptanden vom Typ 1 bis 3 und deren Derivate transportieren Alkalimetall-Kationen^[125] sogar unter Bedingungen, bei denen sich einfache natürliche oder synthetische Makrocyclen als unwirksam erweisen. Die beobachteten Selektivitäten hängen von der Struktur des Liganden, von der Art des Kations und vom Typ des mittransportierten Gegenions ab. Durch gezielte strukturelle Änderungen ist es möglich, einen Kationen-Rezeptor in einen Kationen-Carrier umzuwandeln.^[120, 125] Die mit Cryptanden erhaltenen Ergebnisse lassen erkennen, dass für maximale Transportgeschwindigkeiten eine optimale Komplexstabilität und ein optimales Phasentransfer-Gleichgewicht existiert.^[125] Aus diesen Befunden und denen mit anderen Carriern und Kationen ergibt sich eine glockenförmige Abhängigkeit der Transportgeschwindigkeiten vom Extraktionsgleichgewicht (siehe Abb. 3 in [120]), d.h. niedrige Geschwindigkeiten bei zu geringer oder zu starker (Carriersättigung) Extraktion und maximale Geschwindigkeiten bei halbbeladenen Carriern.^[120, 125] Kinetische Studien ermöglichten es, zwischen den experimentell ermittelten Transportgeschwindigkeiten und Selektivitäten einerseits sowie den Carriereigenschaften andererseits Beziehungen herzustellen.^[124, 126, 127] Genaue Studien zum Transport von K^+ und

Na⁺ durch lipophile Derivate von 2 und 3 in Vesikeln gaben Auskunft über die Leistungsfähigkeit, die Selektivität und den Mechanismus der Vorgänge.^[128]

Durch Veränderung der Bindungsstellen können andere Kationen selektiv transportiert werden, z.B. toxische Metall-Ionen. Makrocyclische Polyether transportieren organische primäre Ammonium-Ionen, insbesondere physiologisch aktive.^[129] Gegenion und Konzentrationsverhältnisse beeinflussen Geschwindigkeit und Selektivität des Transportes.^[120, 125]

Anionen-Transport kann durch lipophile Ammonium-Ionen oder durch Metallkomplexe,^[120, 130] die als Anionen-Rezeptoren fungieren, ausgeführt werden. Fortschritte im Bereich der Anionen-Koordinationschemie dürften eine Reihe von Anionen-Carriern verfügbar machen und dazu beitragen, dieses Gebiet der Transportchemie weiterzuentwickeln.^[131] Von großem Interesse ist der selektive Transport von Carboxylat- und Phosphat-Ionen. Einige Ergebnisse wurden schon früher zusammengefasst.^[120, 131]

Kation/Anion-Cotransport ist mit einem chiralen makrotricyclischen Cryptanden durchgeführt worden, der gleichzeitig ein Alkalimetall-Kation und ein Mandelsäure-Anion transportiert (siehe 39).^[82] Die Kopplung eines Kationen- und eines Anionen-Carriers sollte einen synergetischen Transport mit doppelter Selektion hervorrufen; der Fluss beider Komponenten eines Salzes sollte erleichtert sein (siehe Elektronen/Kationen-Symport, Abschnitt 6.2.1).

Der selektive Transport von Aminosäuren ist auch mit einem Makrotricyclus möglich, der eine nach innen gerichtete Phosphorsäure-Gruppe trägt,^[83b] und mit einem konvergenten Rezeptor mit zwei Carbonsäure-Gruppen.^[132] Neutrale Verbindungen werden von wasserlöslichen Rezeptoren mit lipophilem Hohlraum zwischen zwei organischen Phasen durch eine Wasserschicht hindurch transportiert.^[92b, 132]

Selbstverständlich sind noch viele andere erleichterte Transportvorgänge, besonders für Anionen, Salze und Neutramoleküle, möglich. Es ist auch klar, dass die Rezeptorchemie-Forschung eine Vielfalt an Carriern bereitstellen wird. Von besonderem Interesse sind solche transportwirksamen Substanzen, die sich von Corezeptoren herleiten und einen gekoppelten Transport (Cotransport) ermöglichen.

6.2 Gekoppelte Transportprozesse

Wichtig in der Transportchemie ist die Planung von Carriern und Vorgängen, die den gekoppelten Fluss von zwei (oder mehr) Spezies betreffen und zwar entweder in gleiche (Symport) oder in entgegengesetzte (Antiport) Richtungen. Derartige parallele bzw. antiparallele vektorielle Vorgänge ermöglichen es, gepumpte Systeme aufzubauen, bei denen eine Spezies in dem Kraftfeld transportiert wird, das von einem physikalisch-chemischen Gradienten an Elektronen (Redox-Gradient), Protonen (pH-Gradient) oder anderen Teilchen (Konzentrationsgradient) erzeugt wird. Zu diesem Zweck können entweder zwei oder mehr Carrier für verschiedene Spezies zugleich benutzt werden oder entsprechende Baueinheiten werden in einem einzigen Molekül, einem Cocarrier, untergebracht.

6.2.1 Elektronengekoppelter Transport in einem Redox-Gradienten

Elektronen/Kationen-Symport ist durch einen gekoppelten gleichgerichteten Transport von Elektronen und Metall-Kationen durch einen Elektronen-Carrier und einen selektiven Kationen-Carrier realisiert worden.^[133] Der durch einen Nickelkomplex in einem Redox-Gradienten bewirkte Transport von Elektronen fungiert als Elektronenpumpe, die den selektiven K^+ -Transport durch einen makrocyclischen Polyether antreibt (Abb. 8). Dieser Vorgang weist folgende Merkmale auf: aktiver K^+ -Transport und Elektronenfluss; zwei kooperierende Carrier, die sich synergetisch verhalten; eine Redoxpumpe; Selektierung durch den Kationen-Carrier; Regulierung durch das Kation/Carrier-Paar. Dieses System stellt den Prototyp für die Planung anderer gekoppelter Multicarrier-Transportvorgänge dar. Am Elektronentransport mit Chinon-Carriern ist ein $(2e^-/2H^+)$ -Symport beteiligt.^[134, 135]

Elektronen/Anionen-Antiport ist zum Beispiel mit Carriern wie Ferrocen oder Alkylviologen durchgeführt worden.^[136] Letztere wurden in großem Umfang in lichtgetriebenen Systemen und bei Untersuchungen zur Umwandlung von Sonnenenergie eingesetzt.

6.2.2 Protonengekoppelter Transport in einem pH-Gradienten

Carrier, die negativ geladene Gruppen enthalten, können einen Kationen-Antiport durch Membranen bewirken. Falls eines der Kationen

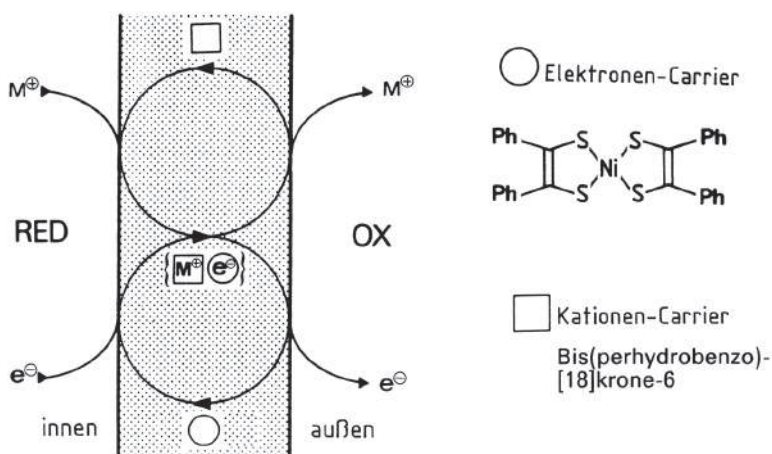


Abbildung 8: Elektronen/Kationen-gekoppelter Transport: Redoxgetriebener Elektronen/Kationen-Symport, an dem ein Elektronen-Carrier (Nickelkomplex) und ein selektiver Kationen-Carrier (makrocyclischer Polyether) beteiligt sind. RED = Kaliumdithionit, OX = $\text{Na}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$.^[133]

ein Proton ist, kann eine Protonenpumpe in einem pH-Gradienten aufgebaut werden. Dies wurde für Alkalimetall-Kationen mit natürlichen oder synthetischen carboxylatenthaltenden Ionophoren verwirklicht.^[137]

Ein besonders interessantes Problem ist der selektive Transport von zweiwertigen Ionen, z.B. Ca^{2+} , in Gegenwart einwertiger Ionen. Der lipophile Carrier **40**, der eine einzelne Kationen-Bindungsstelle und zwei ionisierbare Carboxyl-Gruppen enthält, transportiert in der Dicarboxylat-Form selektiv Ca^{2+} und in der Monocarboxylat-Form selektiv K^+ . Infolgedessen kann der Ionentransport durch pH-Variation gesteuert werden. Diese auffallende Änderung in den Transporteigenschaften hängt mit einer pH-Regulierung der $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ -Selektivität in einem konkurrierenden $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ -Symport zusammen. Letzterer ist an einen $\text{Ca}^{2+}/2\text{H}^+$ - und K^+/H^+ -Antiport in einem pH-Gradienten gekoppelt, wodurch sich eine Protonenpumpe ergibt (Abb. 9).^[138] Dieses System zeigt, wie es durch Carrierdesign gelingt, die Geschwindigkeit und Selektivität von Transportvorgängen zu beeinflussen und sie an Energiequellen zu koppeln, um Spezies gegen einen Konzentrationsgradienten zu transportieren.

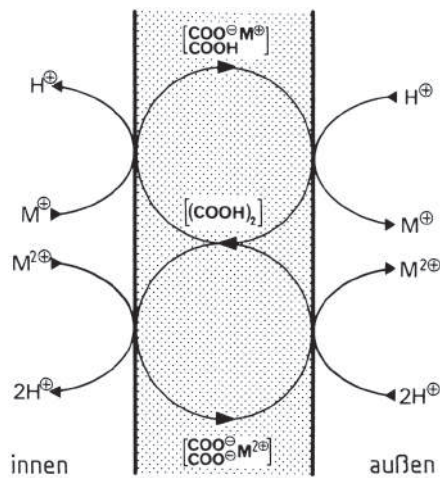


Abbildung 9: Konkurrierender Symport von zwei- und einwertigen Kationen, der an einen $\text{M}^{2+}/2\text{H}^+$ - bzw. M^+/H^+ -Antiport in einem pH-Gradienten gekoppelt ist und durch einen makrocyclischen Carrier wie **40** vermittelt wird; der Zustand des Carriers ist als doppelt protoniert $[(\text{CO}_2\text{H})_2]$ oder komplexiert $[(\text{CO}_2^-)_2 \text{M}^{2+}]$ bzw. einfach protoniert $[(\text{CO}_2\text{H})(\text{CO}_2^-) \text{M}^+]$ gekennzeichnet.

6.2.3 Photonengekoppelte Transportvorgänge

Lichtgetriebener Transport kann durch Photogenerierung einer Spezies erreicht werden, die den Vorgang auslöst bzw. stört. Ein derartiger Vorgang wurde in einem lichtinduzierten Elektronentransport verwirklicht, an dem die Proflavin-sensibilisierte Photogenerierung von reduziertem Methylviologen MV^+ beteiligt ist. Von ihm werden Elektronen auf einen membranständigen Carrier vom Chinon-Typ übertragen.^[135] Lichtgetriebener Elektronen/Kationen-Symport stellt sich ein, wenn dieses System mit dem in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Prozess gekoppelt wird, der durch einen Nickelkomplex und einen Makrocyclus gekennzeichnet ist.^[139] Die erhöhte Lipophilie des reduzierten Viologens erleichtert den Elektronen- und Phasentransfer.^[140] Solche Systeme sind auch für das Speichern von Sonnenenergie von Interesse, wobei eine elektronendurchlässige Membran Reduktions- und Oxidationskomponenten trennt. Photokontrolle von Ionextraktion und Ionentransport ist durch makrocyclische Liganden erreicht worden, deren Konformation sich bei Belichtung ändert und bei denen die Kon-

formere unterschiedliche Ionenaffinitäten haben.^[141] Die bei der Untersuchung gekoppelter Transportvorgänge erzielten Ergebnisse heben die Bedeutung von Cocarriern hervor, die imstande sind, mit Kopplung an physikalische und chemische Energiequellen verschiedene Substrate zu transportieren.

6.3 Transport durch Membrankanäle

Membrankanäle sind aus mehreren Einheiten zusammengesetzte Effektoren, die den Durchtritt von Ionen durch eine Membran über einen Strömungs- oder Sprungmechanismus ermöglichen. Sie spielen beim Transport in biologischen Systemen eine wichtige Rolle. Natürliche und synthetische Peptid-Kanäle (Gramicidin A, Alamethicin) für Kationen sind untersucht worden.^[142, 143] Das Studium künstlicher Kationen-Kanäle dürfte grundlegende Erkenntnisse zum Mechanismus des Kationenflusses und zur Leitung durch Kanäle liefern. Die Struktur des KBr-Komplexes von 12c ($Y = Y' = CH_3$) im Kristall bietet ein Festkörper-Modell für den Transport von Kationen durch Kanäle. Die Makrocyclen sind im Festkörper gestapelt, und die Kationen befinden sich abwechselnd im Innern und über einer makrocyclischen Einheit. Die Struktur sieht aus wie die Momentaufnahme einer Kationenwanderung durch den im Stapel vorhandenen »Kanal«.^[144]

Ein polymerer Stapel von Makrocyclen ist synthetisiert worden.^[145] Außerdem wurde über ein auf Cyclodextrin basierendes Modell einer »Kanalhälfte« berichtet.^[146] Ein Derivat von Monensin, einem cyclischen Polyether-Ionophor, bildet in Vesikeln Kanäle für Li^+ ,^[147] die durch Diammoniumsalze verschlossen werden können.^[148]

Bei zylindrischen Makrotricyclen wie dem leeren Rezeptor von 26 handelt es sich um die Basiseinheiten eines Kationen-Kanals, der sich durch stapelförmige Verknüpfung von Makrocyclen ergibt. Sie binden Alkalimetall-Kationen,^[149] und zwischen dem oberen und dem unteren Ring wurde ein Kationen-Hüpfen beobachtet.^[150] Theoretische Untersuchungen haben Einblicke in die molekulare Dynamik^[151] des Ionen-transportes und die Energieprofile^[152] in Kationen-Kanälen ermöglicht.

Elektronen-Kanäle – »membrandurchspannende Drähte« – sind in bezug auf Kanäle das Gegenstück zu den oben besprochenen mobilen Elektronen-Carriern. Auf diesen Kanaltyp wird in Abschnitt 9.2 näher eingegangen. Auch Anionen-Kanäle wurden ins Auge gefasst.

Es werden derzeit viele Untersuchungen vorgenommen, die darauf ausgerichtet sind, künstliche Kanäle für Ionen zu entwickeln und die Bewegung von Ionen in Kanälen zu verstehen. Diese Effektoren verdienen zunehmende Beachtung, und sie werden sie auch im Hinblick auf ihre Rolle in der molekularen Ionik (siehe Abschnitt 9.3) erhalten.

Der nächste Schritt beim Kanaldesign muss die Einführung von (protonen-, ionen-, redox- oder lichtaktivierbaren) Sperren und Kontrollelementen sein, damit Öffnen und Schließen des Kanals sowie Geschwindigkeit und Selektivität des Transports geregelt werden können. In diesem Zusammenhang sollte man erwähnen, dass ionische Gruppen an Carriern (wie in 40, siehe Abschnitt 6.2.2) für diesen Effekortyp das Gegenstück zu Gating-Mechanismen in Kanälen bilden.

Transportstudien eröffnen also zahlreiche Perspektiven: Effektor-design, Klärung grundlegender Schritte und Mechanismen bei Transportvorgängen, Kopplung an chemische Potentiale, Energie- und Signalverstärkung, Modelle für biologische Transportvorgänge, Aufbau von vesikulären Mikroreaktoren und künstlichen Zellen usw. sowie eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, z.B. bei Trennungs- und Reinigungsverfahren oder in Batterien und Systemen für die künstliche Photosynthese. Die Einführung polytooper Strukturmerkmale, die sowohl selektive Bindungsstellen als auch Gating-Komponenten zur Regelung des Ionenstroms umfassen können, sollte die Planung von Cocarriern und von künstlichen molekularen Kanälen, die Chemie der Effektoren und von Transportvorgängen um eine zusätzliche Dimension erweitern.

7. Von Endo- zu Exorezeptoren

Beim Rezeptordesign ging man hauptsächlich von makrocyclischen oder makropolycyclischen Strukturen aus (siehe Abschnitt 2) und/oder von starren Spacern und Templaten (siehe z.B. [17b, 26, 76-79, 81b, 83c]). Dies ermöglicht es, Bindungsstellen in die Wände von molekularen Hohlräumen oder Spalten so einzubauen, dass sie zum gebundenen Substrat hin konvergieren; dieses ist dann mehr oder weniger vollständig vom Rezeptor umgeben, d.h. es liegt ein Einschluss-Komplex vor. Dieses häufig befolgte Prinzip ist kennzeichnend für eine konvergente oder endosupramolekulare Chemie, wobei Endorezeptoren eine Endoerkennung bewirken. Das Analogon in biologischen Systemen ist das

aktive Zentrum von Enzymen: Ein kleines Substratmolekül wird im Hohlraum eines großen Proteinmoleküls gebunden.

Sind die Bindungsstellen statt an den Innenwänden eines Hohlraums auf einer Außenfläche mit Erhebungen und Vertiefungen, bedeutet dies den Übergang von einer konvergenten zu einer divergenten oder exo-supramolekularen Chemie mit Exo- statt Endorezeptoren. Die Rezeptor/Substrat-Bindung erfolgt dann durch Oberflächen/Oberflächen-Wechselwirkung, die man als Anlagerung (Affixion) bezeichnen und durch // oder durch das mathematische Symbol für Durchschnitt $\cap$ (falls eine merkliche Durchdringung der Oberflächen vorliegt)^[153] darstellen kann, z.B. $[q // \sigma]$ und $[q \cap \sigma]$. Die Exoerkennung mit starker und selektiver Bindung bedarf sowohl einer genügend großen Kontaktfläche und einer ausreichenden Anzahl von Wechselwirkungen als auch geometrischer und elektronischer Komplementarität der Bindungsstellen der Oberflächen von q und σ . Diese Art der Bindung hat ihr Analogon bei biologischen Systemen in den Protein/Protein-Wechselwirkungen, z.B. beim immunologischen Erkennungsprozess (Antikörper/Antigen-Reaktion).^[154] Exoerkennung umfasst nicht nur die Erkennung zwischen (ziemlich großen) Substanzen ähnlicher Größe, sondern auch die Erkennung an Grenzflächen, d.h. Monoschichten, Filmen, Membranen. Zellwänden usw.

7.1 Metallo-Exorezeptoren – Metallonucleate

Um die Bindungskräfte zu verstärken, könnte man daran denken, ein oder mehrere Zentren für starke Wechselwirkungen – Pole – einzuführen, z.B. elektrische Ladungen für starke elektrostatische Kräfte. Dies könnte etwa durch einen Metallkomplex geschehen, dessen Metall-Ion als elektrostatischer Pol fungiert und an dessen Peripherie funktionelle Gruppen, die die molekulare Information enthalten könnten, die für die Substraterkennung erforderlich ist. Außerdem eröffnet das Metall-Ion aufgrund seiner Koordinationsgeometrie (tetraedrisch, quadratisch, planar, oktaedrisch usw.) eine zusätzliche Möglichkeit zur Strukturierung der Wechselwirkungsstellen (Abb. 10). Rezeptordesign nach diesen Grundsätzen begannen wir mit funktionalisierten α, α' -Bipyridinen – Liganden vom Typ 41 –, die Metallkomplexe definierter Geometrie und physikalisch-chemischer Eigenschaften bilden. Mit Nucleosiden werden Spezies wie das Bisadenosin-Derivat 42 erhalten.^[155] Die resultierenden positiv geladenen Metallonucleate sollten mit den nega-

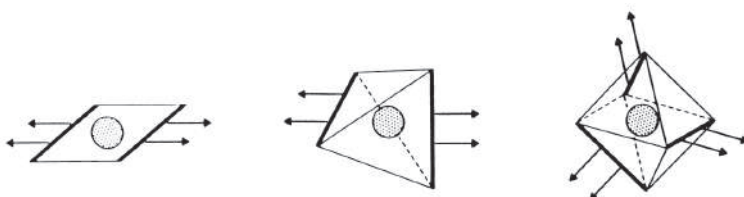


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Anordnung von peripheren Wechselwirkungsstellen (Pfeile) um ein planar, ein tetraedrich und ein oktaedrisch koordiniertes Metall-Ion in einkernigen Metallo-Exorezeptoren.

tiv geladenen Oligonucleotiden und Nucleinsäuren starke und selektive Wechselwirkungen eingehen, wobei der Bindungsort von Art und Anordnung der außen befindlichen Nucleoside abhängig ist.

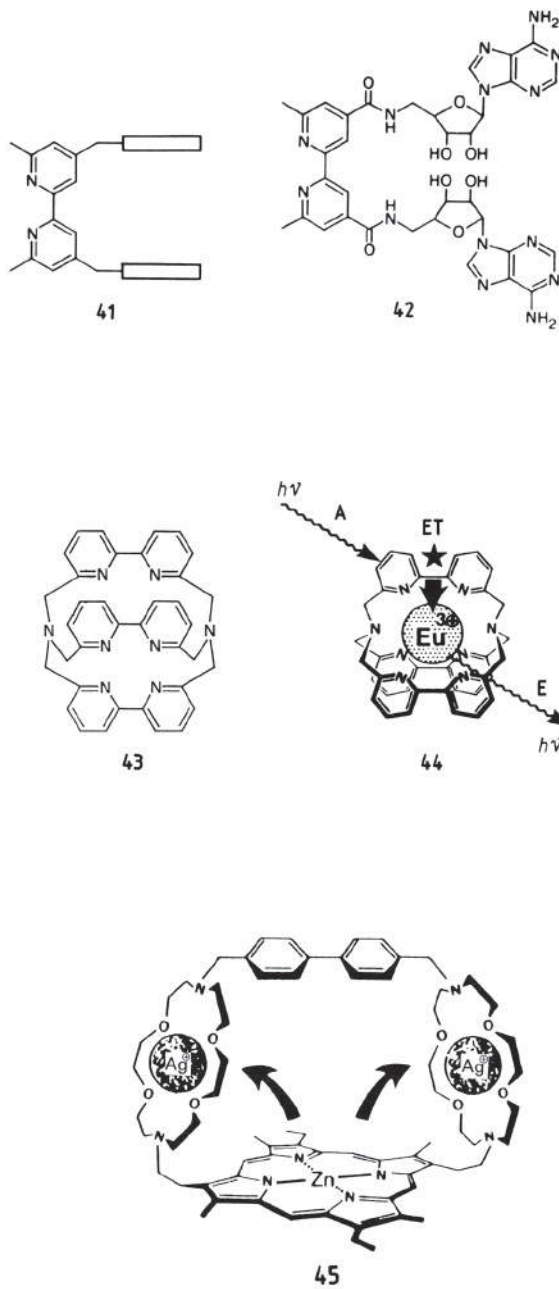
Doppelt helicale Metallonucleate^[155] dürften sich aus den in Abschnitt 9.4 beschriebenen Helicaten gewinnen lassen. Bei den peripheren funktionellen Gruppen kann man sich zahlreiche Abwandlungen vorstellen (intercalierungsfähige Gruppen, Aminosäure- und Oligopeptid-Reste, reaktive Funktionen), so dass Metallkomplexe mit selektivem Anlagerungs- und Reaktionsverhalten (chemisch, photochemisch) zugänglich sein sollten.

7.2 Molekül-Morphogenese

Für das Design von Exorezeptoren braucht man Mittel und Wege, die Außenform eines Moleküls zu gestalten. Dies lässt sich auf vielerlei Weise erreichen, z.B. durch schrittweise Synthese von Molekülen oder durch Metalltemplat-Reaktionen, bei denen wie in Abschnitt 7.1 erwähnt, die Metall-Ionen eine bestimmte Koordinationsgeometrie erzwingen.

Eine weitere Möglichkeit zur Molekülgestaltgebung liegt in der Herstellung kugelförmiger Moleküle, wie der »Starburst-Dendrimere«^[156] und der »Arborole«^[157] deren verzweigte Strukturen durch Kaskadenprozesse gebildet werden.

Startet man eine Kaskade mit einem bestimmten Reaktivbaustein, so sollte es möglich sein, zu Molekülen bestimmter Größe und äußerer Gestalt zu gelangen. Auf polymolekularer Ebene ist dies etwa zu vergleichen mit der Form- und Strukturbildung in zweidimensionalen Lipid-Monoschichten^[158] und in Aggregaten von amphiphilen Molekülen^[159] (siehe auch Abschnitt 8).



Graphik 41-45

8. Von Übermolekülen zu polymolekularen Aggregaten

Molekulare Chemie ist durch mehr oder weniger unabhängige Einzelmoleküle gekennzeichnet. Supramolekulare Chemie lässt sich in zwei große und teilweise überlappende Gebiete aufteilen: 1. Übermoleküle. Dies sind wohldefinierte oligomolekulare Spezies, die aus dem Zusammenschluss einiger weniger Komponenten, z.B. einem Rezeptor und seinem/n Substrat(en), hervorgehen. Sie ergeben sich aus einem inhärenten Aufbauschema, das auf den Prinzipien der molekularen Erkennung basiert. 2. Molekulare Aggregate. Hier handelt es sich um polymolekulare Systeme, die durch spontane Assoziation einer größeren, nicht definierten Zahl von Komponenten entstehen. Dabei werden Phasen gebildet, die sich durch eine wohldefinierte mikroskopische Ordnung und durch makroskopische Eigenschaften auszeichnen: Letztere hängen davon ab, ob es sich um Schichten, Membranen, Vesikel, Micellen, mesomorphe Phasen etc. handelt.^[160]

Die Chemie synthetischer molekularer Aggregate macht derzeit große Fortschritte, da man die Beziehungen zwischen den Eigenschaften der molekularen Komponenten (Struktur, Bindungsstellen usw.), den Charakteristika der Assoziationsprozesse und den Eigenschaften des resultierenden polymolekularen Aggregats immer besser versteht. Molekulare Organisation, Selbstaggregation und Kooperation, Aufbau von Multischicht-Filmen,^[161-164] Erzeugen von Aggregaten mit bestimmter Morphologie^[159] usw. ermöglichen den Aufbau supramolekularer Strukturen. Polymerisation der molekularen Bausteine erwies sich als geeignet, die strukturellen Eigenschaften der polymolekularen Systeme gezielt zu beeinflussen.^[165, 166] Der Einbau reaktiver Gruppen oder Bestandteile kann zu funktionsfähigen Aggregaten führen, die sich für Energie-, Elektronen- oder Ionentransport, Informationsspeicherung, Signalübertragung etc. eignen.^[160, 162, 167, 168] Die Verknüpfung von Rezeptoren, Carriern und Katalysatoren mit polymolekularen organisierten Aggregaten ermöglicht den Aufbau molekularer und supramolekularer Funktionseinheiten sowie die Entwicklung chemischer Mikroreaktoren und künstlicher Zellen.

Polymolekulare Aggregate sind durch Oberflächen begrenzt, auf denen und durch die bestimmte Vorgänge stattfinden können. Dies unterstreicht noch einmal die Bedeutung des Designs von Exorezeptoren, die an Oberflächen wirksam sind.

9. Molekulare und supramolekulare Funktionseinheiten – Chemionik

Molekulare Funktionseinheiten kann man als strukturell organisierte und funktionell zusammenhängende chemische Systeme definieren, die in supramolekulare Strukturen eingebaut sind. Für die Entwicklung derartiger Funktionseinheiten braucht man molekulare Komponenten (Effektoren), die eine bestimmte Funktion ausüben können und für den Einbau in ein organisiertes polymolekulares Aggregat geeignet sind (siehe Abschnitt 8). Die Komponenten können photo-, elektro-, iono-, magneto-, thermo-, mechano- und chemoaktiv sein, je nachdem, ob sie mit Photonen, Elektronen oder Ionen agieren, auf magnetische Felder oder Wärme ansprechen, sich in ihren mechanischen Eigenschaften verändern oder eine chemische Reaktion ausführen können. Entscheidend ist, dass die Komponenten und die resultierenden Funktionseinheiten ihre Funktion(en) auf molekularer und supramolekularer Ebene ausführen.

Molekulare Rezeptoren, Reagentien, Katalysatoren, Carrier und Kanäle sind potentielle Effektoren, die Signale hervorrufen, wahrnehmen, verarbeiten und übermitteln können, indem sie von der dreidimensionalen Informationsspeicherung und Auslesefähigkeit durch molekulare Erkennung Gebrauch machen; ferner eignen sie sich zur Transformation und Translokation von Substraten. Kopplung und Regulierung sind zu erwarten, wenn die Effektoren Baueinheiten enthalten, die sich gegenseitig beeinflussen können und auf diese Anregung ansprechen, z.B. auf Licht, Strom, Wärme, Druck usw.

Je nach Mediator und Substrat der molekularen Funktionseinheiten unterscheidet man eine molekulare Photonik, eine molekulare Elektronik und eine molekulare Ionik. Um diese Gebiete zu erschließen, müssen Effektoren entwickelt werden, die mit entsprechenden Mediatoren reagieren, und ihre mögliche Verwendung als Bestandteil von molekularen Funktionseinheiten muss untersucht werden. Unter diesem Gesichtspunkt werden im folgenden Abschnitt die besonderen Eigenschaften von molekularen Rezeptoren, Carriern und Reagentien näher betrachtet.

9.1 Supramolekulare Photochemie und molekulare Photonik

Es ist zu erwarten, dass beim Einbau photoaktiver und/oder elektroaktiver Effektoren in eine supramolekulare Einheit die Eigenschaften des Grundzustandes und der angeregten Zustände der einzelnen Spezies gestört werden. Dies sollte neuartige Eigenschaften hervorrufen, die in einer supramolekularen Photo- und Elektrochemie Ausdruck finden. Innerhalb eines supramolekularen Systems sind auf diese Weise eine Reihe von regulierbaren Prozessen möglich: photoinduzierter Energietransport, Ladungstrennung durch Elektronen- oder Protonentransfer, Störung von optischen Übergängen und Polarisierbarkeit, Veränderung von Redoxpotentialen in Grund- und angeregten Zuständen, Photoregulierung von Bindungseigenschaften, selektive photochemische Reaktionen usw.

An der supramolekularen Photochemie dürften wie bei der Katalyse drei Schritte beteiligt sein: Bindung zwischen Substrat und Rezeptor, d.h. Bildung eines Übermoleküls, photochemischer Prozess und Wiederherstellung des Ausgangszustandes (Abb. 11).^[169] Die photophysikalischen und photochemischen Eigenschaften von supramolekularen Funktionseinheiten werden intensiv untersucht.

9.1.1 Lichtumwandlung durch Energieübertragung

Eine molekulare Funktionseinheit zur Lichtumwandlung konnte man durch die Folge Absorption(A)-Energietransfer(ET)-Emission(E) verwirklichen, die folgendermaßen ablaufen müsste: Lichtabsorption durch einen Rezeptor, intramolekulare Energieübertragung auf ein gebundenes Substrat, welches dann Licht anderer Wellenlänge emittiert. Dies gelingt mit den Europium(III)- und Terbium(III)-Cryptaten des makrobicyclischen Liganden **43**.^[170] Das durch die bpy-Einheiten absorbierte UV-Licht wird auf das im Molekülhohlraum gebundene Lanthanoid-Kation übertragen, das schließlich sichtbares Licht emittiert; dieser A-ET-E-Prozess ist in **44** skizziert.^[171] Diese Eu^{III}- und Tb^{III}-Komplexe zeigen in wässriger Lösung eine starke Lumineszenz, wohingegen die freien Ionen unter den gleichen Bedingungen nicht emittieren. Für solche Substanzen sind zahlreiche Anwendungen vorstellbar, insbesondere als Lumineszenzmarker für monoklonale Antikörper, Nucleinsäuren, Membranen usw.

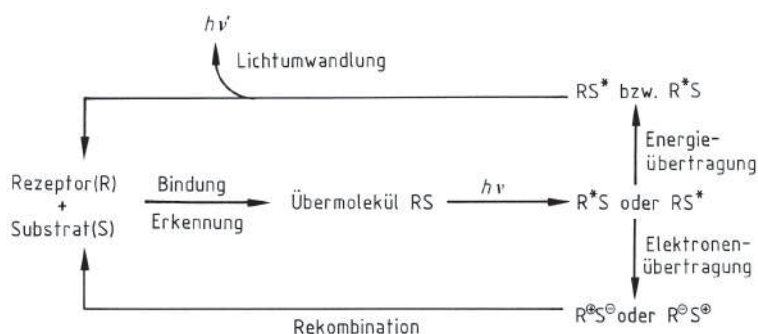


Abbildung 11: Prinzipielle Möglichkeiten supramolekularer Photochemie. Die Zwischenstufen R^*S , RS^* , $R^{\bullet}S^{\bullet}$ und $R^{\bullet}S^{\bullet}$ können alle eine chemische Reaktion einleiten.

Es ist schon eine Reihe photophysikalischer Vorgänge, die in makrocyclischen Komplexen,^[172] Cryptaten^[173] und Molekülkomplexen^[174, 175] auftreten, untersucht worden.

9.1.2 Photoinduzierte Elektronenübertragung in photoaktiven Corezeptoren

Ladungstrennung durch Bestrahlung ist sowohl für die Auslösung photokatalysierter Reaktionen (z.B. für die künstliche Photosynthese) als auch für die Übertragung von Photosignalen (z.B. durch eine Membran) interessant. Dies könnte mit folgendem System verwirklicht werden: Zunächst Anregung eines Photosensibilisators PS, dann Zweielektronen-Transfer von einem Donor D auf einen Akzeptor A, woraus sich D^{2+} -PS- A^{2-} ergibt. Zahlreiche Systeme dieses Typs sind mit dem Ziel, Modelle des photosynthetischen Reaktionszentrums zu erhalten, untersucht worden.

Bei den Donor- und Akzeptorzentren kann es sich um koordinierte Metall-Ionen handeln. So werden z.B., wie in 45 gezeigt, durch Bindung von Silber-Ionen in den seitlichen Makrocyclen eines Corezeptors, der Porphyrin-Gruppen als Photosensibilisatoren enthält, Elektronenakzeptorstellen eingebracht. Dies hat das Löschen des angeregten Singulettzustandes des Zn-Porphyrinzentriums zur Folge und führt zu einer Ladungstrennung und zur Erzeugung eines Porphyrin-Kations mit langer Halbwertszeit.^[176] Systeme, die sich zur photoinduzierten Elek-

tronenübertragung eignen, können als Bestandteile von Funktionseinheiten für Photonen-Elektronen-Umwandlungen verwendet werden. Der in Abschnitt 6.2.3 erwähnte lichtaktivierte Elektronentransport benötigt ebenfalls derartige Systeme.^[135]

9.1.3 Photoinduzierte Reaktionen in supramolekularen Spezies

Die Bindung eines Substrats an einen Rezeptor kann die photochemische Reaktivität einer oder beider Spezies beeinflussen, die Richtung eines Reaktionsablaufes bestimmen oder neuartige Umwandlungen bewirken. Durch sekundäre Komplexierung ist es z.B. möglich, das photochemische Verhalten von Koordinationsverbindungen über die Struktur des Überkomplexes zu steuern. So wird die Photohydrolyse des $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$ -Ions durch Bindung an einen Polyammonium-Makrocyclus deutlich beeinflusst. Die Ergebnisse sind in Einklang mit der Bildung von supramolekularen Spezies, in denen CN^- -Ionen nach photochemischer Spaltung von Co–CN-Bindungen gehindert werden, den Überkomplex zu verlassen.^[63] Es ist daher denkbar, die Richtung von Photosubstitutionsreaktionen an Übergangsmetallkomplexen durch Verwendung geeigneter Rezeptoren zu steuern. Solche Effekte dürften allgemein bei sekundär koordinierten Komplexkationen und -anionen auftreten. Sie eröffnen einen Weg zur Steuerung photochemischer Reaktionen.^[169, 177, 178]

Lichtinduzierte Strukturänderungen in Rezeptoren beeinflussen deren Bindungseigenschaften und bewirken so Freisetzung oder Aufnahme einer Spezies; eine solche Steuerung ist mit makrocyclischen Liganden möglich, die lichtempfindliche Gruppen enthalten.^[141, 172] Von derartigen Effekten konnte man in supramolekularen Funktionseinheiten Gebrauch machen, die sich zur Photonen-Ionen-Umwandlung eignen (Erzeugung von Protonen-/Ionen-Photosignalen).

9.1.4 Nichtlineare optische Eigenschaften supramolekularer Spezies

Verbindungen, die eine große Polarisierbarkeit aufweisen, zeigen in der Regel auch starke makroskopische nichtlineare optische (NLO-)Effekte.^[179] Dies trifft auf »Pushpull«-Verbindungen mit Elektronendonor- und -akzeptor-Einheiten zu. Auf die potentiellen NLO-Eigenschaften von Materialien, die auf Metallkomplexen und supramolekularen Spezies basieren, wurde kürzlich hingewiesen.^[179b]

D-PS-A-Systeme, die wegen ihrer Fähigkeit untersucht wurden, ladungsgetrennte Zustände zu bilden, haben solche Eigenschaften. Es kann sich dabei um Metall- oder um Molekülkomplexe handeln. Ionenabhängige optische Veränderungen in Indikatorliganden^[180] könnten eine Steuerung von NLO-Eigenschaften durch Kationen ermöglichen. Molekulare Elektronendonator-/akzeptor-Komplexe könnten NLO-Effekte zeigen, da sie schon im Grundzustand polarisiert sind und bei Anregung eine (teilweise) intermolekulare Ladungstrennung auftritt. Es ist möglich, ihre Polarisierung, Polarisierbarkeit, das Ausmaß an Ladungstransfer, die Absorptionseigenschaften usw. durch Veränderungen sowohl in den Grundstrukturen als auch in den Substituenten mehr oder weniger fein abzustimmen (siehe z.B. [174, 179c]).

In einem größeren Rahmen gesehen, könnten solche Untersuchungen zur Entwicklung photoaktiver molekularer Funktionseinheiten führen, die auf photoinduzierter Energieumwandlung, Elektronentransfer, Substratfreisetzung oder chemischer Umwandlung in Übermolekülen basieren. Hierfür ist ein entsprechendes Moleküldesign, ein Planen intermolekularer Bindungen und supramolekularer Strukturen mit photophysikalischen, photochemischen und optischen Eigenschaften, also eine Art molekularer Photonik nötig.

9.2 Molekulare Elektronik

Der molekularen Elektronik und der Möglichkeit zur Entwicklung elektronischer Funktionseinheiten, die auf molekularer Ebene arbeiten, wird immer mehr Aufmerksamkeit entgegengebracht.^[3, 181] Molekulare Gleichrichter, Transistoren und Photodioden sind z.B. ins Auge gefasst worden. Letztere setzen Eigenschaften, wie die von Charge-Transfer-Zuständen in organischen Molekülen, in Metallkomplexen und in D-PS-A-Systemen, voraus (siehe Abschnitt 9.1.2 und zitierte Literatur in [182]).

Als Grundbaustein einer molekularen Elektronik sind »molekulare Drähte« – Verbindungs- oder Anschlussstücke, die den Elektronenfluss zwischen verschiedenen Teilen des Systems ermöglichen, von fundamentaler Bedeutung. Einen Zugang zu molekularen Drähten bieten die Caroviologene, vinyloge Derivate von Methylviologen, die Eigenschaften der Carotinoide und Viologene aufweisen.^[182] Sie haben alle Merkmale, die für einen molekularen Draht erforderlich sind: eine konjugierte Polyenkeette für die Elektronenleitung; endständige, elektro-

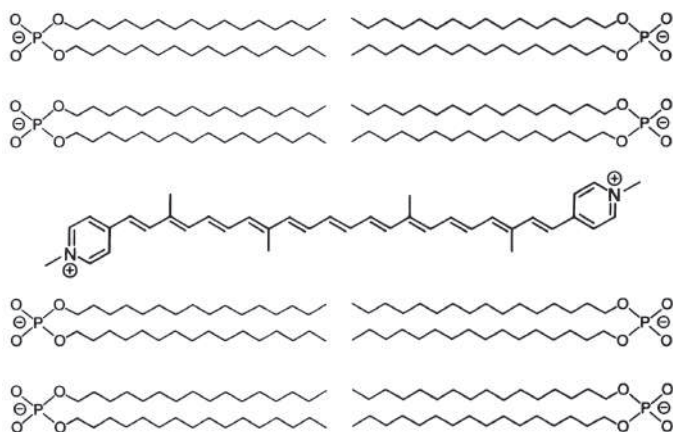


Abbildung 12: Membrandurchspannende Einlagerung eines Caroviologens – eines »molekularen Drahts« – in Vesikel aus Natriumdihexadecylphosphat.

aktive und wasserlösliche Pyridinium-Gruppen für den reversiblen Elektronenaustausch; eine hinreichende Länge, um typische molekulare Stützelemente wie Mono- oder Doppelschichtmembranen zu durchspannen.

Caroviologene wurden in Vesikel aus Natriumdihexadecylphosphat eingebaut. Die Messergebnisse stimmen mit einem Strukturmodell überein, bei dem die Caroviologene die Doppelschichtmembran durchspannen und die Pyridinium-Enden in die negativ geladene äußere und innere Oberfläche der Vesikel eingebettet sind (Abb. 12). Diese und andere funktionalisierte Membranen werden im Hinblick darauf untersucht, dass das Caroviologen als kontinuierlicher, durch die gesamte Membran reichender Elektronen-Kanal fungiert, d.h. als echter molekularer Draht. Im Vergleich zum Elektronentransport durch redoxaktive mobile Carrier (siehe Abschnitt 6.2.1) verkörpern die Caroviologene Elektronen-Kanäle und sie verhalten sich zu Elektronen-Carriern wie Kationen-Kanäle zu Kationen-Carriern.

Dieser erste Zugang zu molekularen Drähten fordert zu Abwandlungen der Endgruppen und der Polyenkette geradezu heraus.^[183] Über die Kopplung mit photoaktiven Gruppen z.B. könnten durch Licht schaltbare Elektronen-Kanäle entstehen sowie Funktionseinheiten zur Ladungstrennung und zur Signalübertragung. In Kombination mit größeren Aggregaten wie polymeren Schichten oder mesomorphen Phasen

sowie mit anderen molekularen Komponenten könnte es möglich werden, Stromkreise und komplexere elektronische Systeme im Nanometerbereich zu bauen.

Redoxveränderungen eines elektroaktiven Rezeptors oder Carriers führen zu Änderungen im Bindungs- oder Transportverhalten, wodurch wiederum Freisetzung oder Aufnahme des Substrats bewirkt wird. Zu diesem Zweck wurden Redoxpaare wie Disulfid/Dithiol^[184, 185 a] und Chinon/Hydrochinon^[185] in die Rezeptoren eingebaut und es wurde gezeigt, dass sich ihre Substratbindungseigenschaften ändern. Die Redox Eigenschaften von Hexacyanometallaten $[M(CN)_6]^{n-}$ werden durch Komplexierung mit Polyammonium-Makrocyclen beträchtlich gestört.^[61] Diese durch die Rezeptor/Substrat-Assoziation modulierbaren elektrochemischen Eigenschaften kennzeichnen eine supramolekulare Elektrochemie. Die wechselseitigen Effekte zwischen den Änderungen im Redoxverhalten und der Bindungsstärke in einem Rezeptor/Substrat-Paar könnten eine »Elektrokontrolle« der Komplexierung ermöglichen und umgekehrt eine Abänderung der Redox Eigenschaften durch Bindung (siehe auch den nächsten Abschnitt).

9.3 Molekulare Ionik

Die zahlreichen Rezeptoren, Reagentien und Carrier für anorganische und organische Ionen sind potentielle Bestandteile molekularer und supramolekularer ionischer Funktionseinheiten für regelbare, hochselektive Erkennungs-, Reaktions- und Transportvorgänge. In der molekularen Ionik sind ionische Spezies die Träger für Speicherung, Verarbeitung und Übertragung von Signalen und Information. Angesichts der Größe und Masse von Ionen ist zu erwarten, dass ionische Funktionseinheiten langsamer arbeiten als elektronische. Dafür haben aber Ionen aufgrund ihrer vielfältigen atomaren oder molekularen (Ladung, Größe, Form bzw. Struktur) und supramolekularen (Bindungsgeometrie, Bindungsstärke und Selektivität) Merkmale einen hohen Informationsgehalt. Molekulare Ionik ist ein vielversprechendes Forschungsgebiet, das auf ein reichhaltiges Wissen über Ionenvorgänge, die durch natürliche und synthetische Rezeptoren und Carrier ausgeübt werden, zurückgreifen kann.

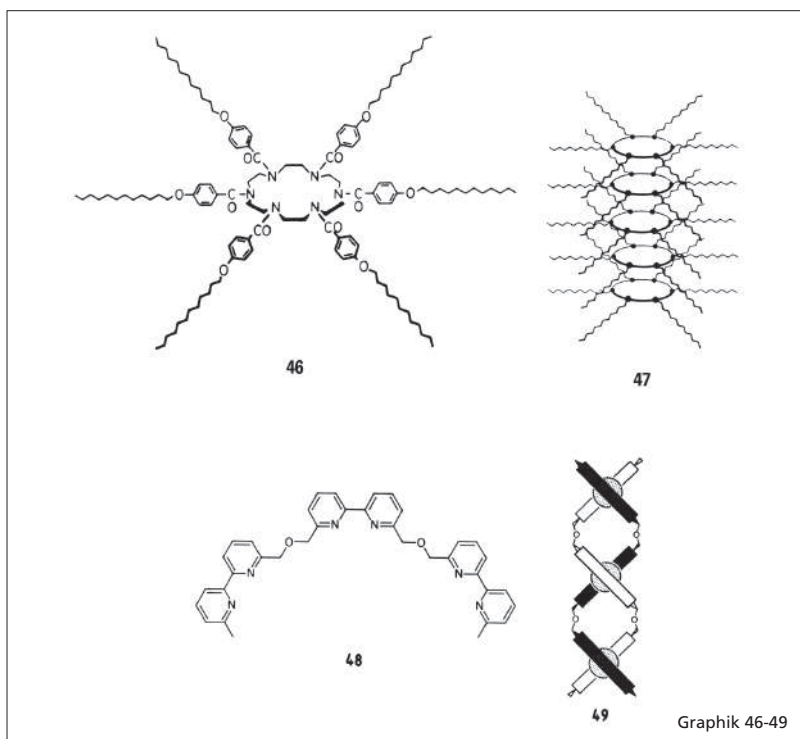
Selektive Ionen-Rezeptoren sind die Grundkomponenten für ionische Transmitter und Detektoren; selektive Ionen-Carrier eignen sich als ionische Wandler. Diese Einheiten können mit molekularen Schal-

tern ausgerüstet werden, die auf äußere physikalische (Licht, Strom, Wärme, Druck) oder chemische (andere bindende Spezies, Steuerungsstellen) Reize ansprechen.

Bindung, Transport und Auslösung können durch getrennte Einheiten ausgeführt werden, wobei jede, wie in Multicarrier-Transportsystemen (siehe Abschnitt 6.2), eine bestimmte Funktion erfüllt.^[133] Dadurch wird eine Vielfalt an Kombinationen zwischen photo- und elektroaktiven Komponenten und unterschiedlichen Rezeptoren oder Carriern ermöglicht. Es sind auch licht- und redoxempfindliche Gruppen in Rezeptoren und Carrier eingebaut worden und es wurde gezeigt, dass sie Bindungs- und Transportverhalten beeinflussen (siehe [141, 172, 184, 185] und dort zitierte Literatur). Corezeptoren und Cocarrier eröffnen Wege, durch Cofaktoren und cogegebene Spezies die Wechselwirkung mit dem Substrat zu regulieren. Folglich ist eine einfache ionisierbare Gruppe, z.B. eine COOH-Gruppe, ein Protonenschalter und führt zu Gate-Typ-Rezeptoren und -Carriern, die auf pH-Änderungen ansprechen, wie man es beispielsweise bei der Regulierung der Transportselektivität durch Verbindung **40** beobachtet hat.^[138]

Das Hauptproblem besteht darin, dass in sehr vielen Systemen die Änderungen, die durch den Schaltvorgang bewirkt werden, nicht genügend groß sind. Es sei hervorgehoben, dass durch Protonierung/Deprotonierung steuerbare ja/nein- oder +/--Schalter potentiell in Polyamin-Rezeptoren und -Carriern enthalten sind, d.h. im nichtprotonierten Zustand könnten Kationen gebunden und transportiert werden, im protonierten Zustand hingegen Anionen. Auch Zwitterionen wie Aminosäuren können durch Änderung des pH-Wertes vom gebundenen in den ungebundenen Zustand (und umgekehrt) übergehen. Molekulare protonische Funktionseinheiten sind somit ein besonders interessanter Spezialfall ionischer Funktionseinheiten. Ein Protonen leitender Kanal wäre ein Protonendraht.

Funktionelle molekulare Systeme bieten die Möglichkeit, molekulare Funktionseinheiten aufzubauen und Regulierungsvorgänge sowie kooperative Prozesse einzuführen, die eine wesentlich stärkere Reaktion des Systems auf Reize auslösen können. Vesikel sind mit funktionellen Einheiten^[168] ausgestattet worden, z.B. mit einem Li⁺-Kanal, der verschlossen werden kann.^[147, 148] Flüssigkristalle aus makrocyclischen Molekülen mit mesogenen Gruppen wie **46** bilden tubulare Mesophasen mit einer stapelförmigen Anordnung der Ringe (siehe **47**); dabei könnten phasenabhängige Ionen-Kanäle entstehen.^[186, 187] Kooperati-



vität und Fähigkeit zur Selbstorganisation können auch direkt in die molekularen Komponenten eingeplant werden (siehe nächsten Abschnitt).

Biologische Informationen und Signale werden durch Metall-Ionen und Moleküle (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} bzw. Acetylcholin, cyclisches AMP usw.) übermittelt. Polytope Metalloproteine wie Ca^{2+} -bindende Proteine lösen komplizierte Aufgaben der Erkennung, Verarbeitung und Übermittlung ionischer Signale.^[188] Die Fähigkeiten biologischer Systeme stimmen optimistisch und liefern Anregungen für die Entwicklung einer molekularen Ionik.

An dieser Stelle sollte man erwähnen, dass Ionen-Rezeptoren, -Kanäle, -Schalter und -Sperrern im Zusammenhang mit einem möglichen europäischen Forschungsprojekt über *Ionic Adaptive Computers* in Betracht gezogen wurden. Bei den Anwendungen, z.B. selektiven chemischen Sensoren, die auf molekularer Erkennung beruhen, sind schon gute Fortschritte erzielt worden.^[121]

9.4 Systeme mit der Fähigkeit zum Selbstaufbau

Selbstorganisation und Mehrfachbindung mit positiver Kooperativität sind Prozesse, die es gestatten, molekulare Funktionseinheiten zur Verstärkung, z.B. von Signalen, zu planen (molekulare Verstärker). Solche Phänomene sind in der Biologie gut bekannt, viel weniger aber in der Chemie. Polytope Corezeptoren mit mehreren Bindungsstellen können mit bestimmten Substraten selbstorganisierende Systeme bilden, falls die Bindung eines Substratmoleküls an ein Rezeptormolekül eine neue Bindungsstelle am Substratmolekül erzeugt, was die Assoziation mit einem weiteren Rezeptormolekül auslöst.

Es ist bei weitem schwieriger, eine solche positive Kooperativität bei der Substratbindung zu erzeugen als eine negative. Jedoch sind beide Effekte für Regulierungsvorgänge von Interesse. Kooperativität lässt sich bei der ungewöhnlichen Erleichterung der Zweitprotonierung von 5 durch ein Wassermolekül als Effektor (siehe 10) nachweisen.^[40]

Bei der Bindung von Kationen an makrocyclische Polyether sind allosterische Effekte im Sinne von ferngelenkten Konformationsänderungen (*remote site control*) untersucht worden.^[17a] In einem dimeren Porphyrin wurde Kooperativität der Untereinheiten nachgewiesen.^[189]

Die spontane Bildung der Doppelhelix von Nucleinsäuren entspricht dem Selbstaufbau einer supramolekularen Struktur, die durch das vorgegebene Muster der Base-Base-Wechselwirkungen verursacht wird. Molekulare Erkennung und positive Kooperativität sind essentielle Charakteristika der Basenpaarung.^[190]

Kürzlich konnte demonstriert werden, dass ein derartiger Selbstaufbau mit Kettenliganden, d.h. acyclischen Corezeptoren möglich ist, die hintereinander mehrmals die gleiche Bindungsstelle enthalten. Basierend auf früheren Arbeiten mit einem Quaterpyridin-Liganden wurden kettenförmige Oligobipyridin-Liganden mit zwei bis fünf Bipyridin-Einheiten hergestellt. In Gegenwart von Cu^I-Ionen lagern sich diese Liganden spontan zu doppelsträngigen Helicaten aus zwei Ligandmolekülen und einem Cu^I-Ion pro bpy-Doppeleinheit zusammen. Die beiden Rezeptorstränge sind um die Metall-Ionen gewickelt, die sie zusammenhalten. Beispielsweise bildet der tris-bpy-Ligand **48** den dreikernigen Komplex **49**, dessen Struktur im Kristall bestimmt worden ist; in der Tat handelt es sich um eine anorganische Doppelhelix.^[191] Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Vorgang möglicherweise mit positiver Kooperativität abläuft, indem die Komplexbildung des ersten

Cu^I-Ions durch zwei Liganden die des nächsten erleichtert. Ferner fanden wir, dass in einer Mischung von Liganden mit unterschiedlicher Anzahl von bpy-Einheiten die Paarung vorzugsweise zwischen gleichen Liganden eintritt, d.h. es findet eine »Selbst-Erkennung« statt. Durch die spontane Bildung geordneter zwischenmolekularer Strukturen werden Möglichkeiten eröffnet, selbstorganisierende Systeme zu planen und zu untersuchen, die über Kooperativitäts-, Regulierungs- und Verstärkungseigenschaften verfügen. Bei katalytischen Reaktionen, dem Schließen und Öffnen von Kanälen und bei Phasenveränderungen handelt es sich um weitere Vorgänge, die zur Auslösung von Verstärkereffekten genutzt werden könnten.

Verschiedene darüber hinausgehende Entwicklungen in organischer, anorganischer und biochemischer Richtung können ins Auge gefasst werden. Werden z.B. Substituenten in den *p*-Positionen der sechs Pyridin-Einheiten von **48** eingeführt, sollte sich bei Behandlung mit Cu^I eine anorganische Doppelhelix mit funktionellen Gruppen an der Außenseite bilden.^[155] Um den Selbstaufbau zu steuern, braucht man molekulare Komponenten, die sich spontan zum gewünschten supramolekularen Verband organisieren. Moleküldesign im Hinblick auf die Steuerung des Selbstaufbaus dürfte schon bald ein lebhaft bearbeitetes Forschungsgebiet werden.

9.5 Chemionik

Einzelkomponenten und molekulare Funktionseinheiten wie Drähte, Kanäle, Widerstände, Gleichrichter, Dioden und photosensitive Elemente lassen sich möglicherweise zu funktionellen Nanostrukturen zusammensetzen und mit geordneten polymolekularen Aggregaten kombinieren. Auf diese Weise könnten eventuell Systeme erzeugt werden, mit denen Detektion, Speicherung, Verarbeitung und Verstärkung von Signalen und Information durch Mediatoren (Photonen, Elektronen, Protonen, Metall-Ionen, Anionen, Moleküle) inklusive Kopplung und Regulierung möglich sind.^[3, 8, 181, 182, 192]

Molekulare Photonik, Elektronik und Ionik sind drei Bereiche dieses faszinierenden und futuristisch anmutenden Gebietes der Chemie, das man als Chemionik bezeichnen könnte.^[3, 8] Es umfasst Design und funktionelle Realisierung photochemischer, elektronischer und ionischer Einzelkomponenten, Funktionseinheiten und ganzer Systeme für die Verarbeitung von Signalen und Informationen auf molekularer

Ebene. Dies sind natürlich Fernziele,^[193] aber auf dem Weg dorthin könnten sich zahlreiche nutzbringende Nebenergebnisse einstellen. Auf jeden Fall lohnt es sich bereits jetzt, auf dieses Ziel hinzuarbeiten.

10. Schluss

Mit diesem Beitrag sollte der Rahmen der supramolekularen Chemie abgesteckt werden, es sollten Beispiele gegeben und Perspektiven erkundet werden. Die Grundkonzepte wurden Schritt für Schritt erarbeitet; die sehr rege Forschungstätigkeit in den Bereichen molekulare Erkennung, Katalyse und Transport und darüber hinaus molekulare Oberflächen und polymolekulare Aggregate hat bereits zu umfangreichen Kenntnissen über das molekulare Verhalten auf supramolekularer Ebene geführt. Es versteht sich von selbst, dass für die Planung und Verwirklichung zahlreicher anderer vorstellbarer Systeme und Vorgänge noch viel chemische Grundlagenforschung betrieben werden muss. Die bisher erzielten Ergebnisse sollten der Weiterentwicklung von Komponenten molekularer Funktionseinheiten dienen, die hochselektive Funktionen wie Erkennung, Umwandlung, Übertragung, Regulation und Kommunikation ausführen können und die Verarbeitung von Signalen und Information ermöglichen. Hierfür ist die Ausnutzung intermolekularer Wechselwirkungen und die Berücksichtigung der Dimension Zeit im Erkennungsgeschehen nötig. Die Ähnlichkeit solcher Funktionen mit einigen Charakteristika lernfähiger Systeme (Expertensysteme) ist evident und damit auch eine Verknüpfung künstlicher Intelligenz mit molekularem Verhalten.

Diese Entwicklungen in der molekularen und supramolekularen Wissenschaft und Technik bieten interessante Perspektiven im Grenzbereich zwischen Chemie, Physik und Biologie. Auch wenn ein Blick in die Zukunft trotz Berücksichtigung des aktuellen Kenntnisstands und laufender Forschungsprojekte naturgemäß Unschärfen hat – bei einer solchen Feier scheint es gerechtfertigt, denn:

Wer am Grunde eines Brunnens sitzt
und den Himmel betrachtet,
dem wird er klein erscheinen.

Han Yu, 768-824

Literatur

- [1] J.-M. Lehn, *Struct. Bonding* (Berlin) 16 (1973) 1.
- [2] J.-M. Lehn, *Pure Appl. Chem.* 50 (1978) 871.
- [3] J.-M. Lehn, *Leçon Inaugurale. Collège de France, Paris* 1980.
- [4] R. Pfeiffer: *Organische Molekülverbindungen*, Enke Verlag, Stuttgart 1927.
- [5] K.L. Wolf, H. Frahm, H. Harms, *Z. Phys. Chem. Abt. B* 36 (1937) 17; K.L. Wolf, H. Dunken, K. Merkel, *ibid.* 46 (1940) 287; K.L. Wolf, R. Wolff, *Angew. Chem.* 61 (1949) 191.
- [6] J.-M. Lehn, *Acc. Chem. Res.* 11 (1978) 49.
- [7] J.-M. Lehn in Z.I. Yoshida, N. Ise (Hrsg.): *Biomimetic Chemistry*, Kodansha Tokio/Elsevier, Amsterdam 1983, S. 163.
- [8] J.-M. Lehn, *Science* 227 (1985) 849.
- [9] P. G. Potvin, J.-M. Lehn in R. M. Izatt, J. J. Christensen (Hrsg.): *Synthesis of Macrocycles: The Design of Selective Complexing Agents* (*Prog. Macrocyclic Chem.* 3), Wiley, New York 1987, S. 167.
- [10] E. Fischer, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 27 (1894) 2985.
- [11] F. Cramer, W. Freist, *Acc. Chem. Res.* 20 (1987) 79.
- [12] J. F. Stoddart, *Chem. Soc. Rev.* 8 (1979) 85; *Annu. Rep. Prog. Chem. Sect. B* 1983, 353.
- [13] D. J. Cram, J. M. Cram, *Acc. Chem. Res.* 11 (1978) 8.
- [14] R. C. Hayward, *Chem. Soc. Rev.* 12 (1983) 285.
- [15] I. O. Sutherland, *Chem. Soc. Rev.* 15 (1986) 63.
- [16] G. van Binst (Hrsg.): *Design and Synthesis of Organic Molecules Based on Molecular Recognition*. Springer, Berlin 1986.
- [17] a) J. Rebek, Jr., *Acc. Chem. Res.* 17 (1984) 258; b) *Science* 235 (1987) 1478.
- [18] a) W. Bartmann, K. B. Sharpless (Hrsg.): *Stereochemistry of Organic and Bioorganic Transformations*. VCH Verlagsgesellschaft 1987; b) P. B. Deravan, R. S. Youngquist, J. P. Sluka in [18a], S. 221; c) W. C. Still in [18a], S. 235.
- [19] R. M. Izatt, J. J. Christensen (Hrsg.): *Prog. Macrocyclic Chem.* 1-3. Wiley, New York 1979, 1981 bzw. 1987.
- [20] F. Vögtle (Hrsg.): *Host Guest Chemistry* (*Top. Curr. Chem.* 98 (1981), 101 (1982)); F. Vögtle, E. Weber (Hrsg.): *ibid.* 121 (1984).
- [21] J. L. Atwood, J. E. D. Davies, D. D. MacNicol: *Inclusion Compounds*, Vol. 1-3, Academic Press, London 1984.
- [22] G. Wipff, P. Kollman, J.-M. Lehn, *J. Mol. Struct.* 93 (1983) 153; G. Ranzhino, S. Romano, J.-M. Lehn, G. Wipff, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 7873; G. Wipff, P. Kollman, *Nouv. J. Chim.* 9 (1985) 457; S. Lifson, M. Levitt (Hrsg.): *Structure and Dynamics of Macromolecules* (*Isr. J. Chem.* 27 (1986) Nr. 2).
- [23] Eine Vorstellung über die jeweilige Rolle von »Zusammenbringen« und »Organisieren« lässt sich durch Betrachtung der Energien gewinnen, die

für eine Reihe von $[\text{Li}(\text{NH}_3)_n]^+$ -Komplexen und die entsprechenden $(\text{NH}_3)_n$ -Einheiten – bei gleicher Anordnung – berechnet wurden. Die Komplexbildungsenergien in Gegenwart von Li^+ sind bei optimierten $\text{Li}^+\cdots\text{NH}_3$ -Abständen erhalten worden. Wenn Li^+ entfernt ist und die NH_3 -Moleküle noch in derselben Position sind, beziehen sich die berechneten Energien nur auf die Koordinationssphäre; diese Energien resultieren aus der Abstoßung zwischen den NH_3 -Gruppen. Sie sind ein Maß für die Abstoßungsenergie, die aufgebracht werden muss, um zwei, drei oder vier Amin-Bindungsstellen in einem mehrzähligen Liganden gleicher Koordinationsgeometrie zusammenzubringen.

Ergebnisse $(\text{NH}_3)_n$, Geometrie (Abstoßungsenergie [kcal/mol]): $(\text{NH}_3)_2$, linear (–2,4), abgewinkelt (–3,8); $(\text{NH}_3)_3$, trigonal (–9,1), pyramidal (–10,8); $(\text{NH}_3)_4$, tetraedisch (–20,8). Somit sind die Gesamtenergien für das Zusammenbringen der Bindungsstellen merklich höher als die Energien für das Organisieren, d.h. bei Änderungen der Geometrien, z.B. von linear nach gewinkelt (1,4 kcal/mol) bzw. von trigonal nach pyramidal (1,7 kcal/mol). Die *ab-initio*-Berechnungen wurden mit einem Basissatz von Gauß-Funktionen, der zu einem Doppelsatz kontrahiert wurde und eine zusätzliche Polarisationsfunktion enthielt, durchgeführt: J.-M. Lehn, R. Ventavoli, unveröffentlicht; vgl. auch R. Ventavoli, 3è Cycle Thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1972.

- [24] a) Yu.A. Ovchinnikov, V.T. Ivanov, A.M. Skrob: Membrane Active Complexes. Elsevier, New York 1974; b) B.C. Pressman, Annu. Rev. Biochem. 45 (1976) 501; c) H. Brockmann, H. Geeren, Justus Liebigs Ann. Chem. 603 (1957) 217; d) M.M. Shemyakin, N.A. Aldanova, E.I. Vinogradova, M.Yu. Feigina, Tetrahedron Lett. 1963, 1921; e) C. Moore, B.C. Pressman, Biochem. Biophys. Res. Commun. 15 (1964) 562; f) B.C. Pressman, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 53 (1965) 1077; g) J. Beck, H. Gerlach, V. Prelog, W. Voser, Helv. Chim. Acta 74 (1962) 620; h) Z. Stefanac, W. Simon, Chimia 20 (1966) 436; Microchem. J. 12 (1967) 125; i) K.T. Kilbourn, J.D. Dunitz, I.A.R. Pioda, W. Simon, J. Mol. Biol. 30 (1967) 559; j) P. Mueller, D.O. Rudin, Biochem. Biophys. Res. Commun. 26 (1967) 398; k) T.E. Andreoli, M. Tieffenberg, D.C. Tosteson, J. Gen. Biol. 50 (1967) 2527; l) M.M. Shemyakin, Yu.A. Ovchinnikov, V.T. Ivanov, V.K. Antonov, A.M. Skrob, I.I. Mikhaleva, A.V. Evstratov, G.G. Malenkov, *ibid.* 29 (1967) 834; m) B.C. Pressman, E.J. Harris, W.S. Jagger, J.H. Johnson, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 58 (1967) 1949.
- [25] a) C.J. Pedersen, J. Am. Chem. Soc. 89 (1967) 7017; b) C.J. Pedersen, H.K. Frensdorff, Angew. Chem. 84 (1972) 16; Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 11 (1972) 16.
- [26] D.J. Cram, Angew. Chem. 98 (1986) 1041; Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 25 (1986) 1039.
- [27] D. Parker, Adv. Inorg. Chem. Radiochem. 27 (1983) 1; B. Dietrich, J. Chem. Ed. 62 (1985) 954. Bezüglich sepulcrumartig eingeschlossener Metall-Ionen siehe A.M. Sargeson, Pure Appl. Chem. 56 (1984) 1603.

- [28] a) J.-M. Lehn, J.-P. Sauvage, *J. Am. Chem. Soc.* 97 (1975) 6700; b) B. Dietrich, J.-M. Lehn, J.-P. Sauvage, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1973, 15.
- [29] a) B. Dietrich, J.-M. Lehn, J.-P. Sauvage, *Tetrahedron Lett.* 1969, 2885, 2889; b) B. Dietrich, J.-M. Lehn, J.-P. Sauvage, *J. Blanzat, Tetrahedron* 29 (1973) 1629; B. Dietrich, J.-M. Lehn, J.-P. Sauvage, *ibid.* 29 (1973) 1647; c) B. Metz, D. Moras, R. Weiss, *Chem. Commun.* 1970, 217; F. Mathieu, B. Metz, D. Moras, R. Weiss, *J. Am. Chem. Soc.* 100 (1978) 4412, *zit. Lit.*
- [30] E. Graf, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 97 (1975) 5022; *Helv. Chim. Acta* 64 (1981) 1040.
- [31] B. Dietrich, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [32] E. Graf, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 98 (1976) 6403.
- [33] F. Schmidtchen, G. Müller, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1984, 1115.
- [34] J. L. Dye, *Angew. Chem.* 91 (1979) 613; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 18 (1979) 587; J. L. Dye, M. G. DeBacker, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 38 (1987) 271.
- [35] J.-M. Lehn, *Pure Appl. Chem.* 52 (1980) 2303.
- [36] A. I. Popov, J.-M. Lehn in G. A. Melson (Hrsg.): *Coordination Chemistry of Macrocyclic Compounds*. Plenum Press, New York 1979, S. 537.
- [37] I. M. Kolthoff, *Anal. Chem.* 51 (1979) 1R.
- [38] F. Montanari, D. Landini, F. Rolla, *Top. Curr. Chem.* 101 (1982) 203; E. Blasius, K.-P. Janzen, *ibid.* 98 (1981) 163.
- [39] E. Graf, J.-M. Lehn, J. LeMoigne, *J. Am. Chem. Soc.* 104 (1982) 1672.
- [40] E. Graf, J.-P. Kintzinger, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [41] B. Dietrich, J.-P. Kintzinger, J.-M. Lehn, R. Metz, A. Zahidi, *J. Phys. Chem.* 91 (1987) 6600.
- [42] a) D. J. Cram, K. N. Trueblood, *Top. Curr. Chem.* 98 (1981) 43; b) F. De Jong, D. N. Reinhoudt in V. Gold, D. Bethell (Hrsg.): *Adv. Phys. Org. Chem.* 17 (1980) 219.
- [43] J.-M. Lehn, P. Vierling, *Tetrahedron Lett.* 21 (1980) 1323.
- [44] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, P. Vierling, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1976, 621; *Helv. Chim. Acta* 65 (1982) 1853.
- [45] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 63 (1980) 2112.
- [46] H. M. Colquhoun, J. F. Stoddart, D. J. Williams, *Angew. Chem.* 98 (1986) 483; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 25 (1986) 487.
- [47] Bei der Bindung von $[\text{Ru}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ an 12b oder an das Hexacarboxylat von 14 wurden Stabilitätskonstanten von ungefähr 800 bzw. 10^5 L mol^{-1} erhalten (wässrige Lösung, pH = 7.3); J.-M. Lehn, P. Vierling, unveröffentlichte Ergebnisse.
- [48] J. C. Metcalfe, J. F. Stoddart, G. Jones, *J. Am. Chem. Soc.* 99 (1977) 8317; J. Krane, O. Aune, *Acta Chem. Scand. B* 34 (1980) 397.
- [49] a) J.-M. Lehn, P. Vierling, R. C. Hayward, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1978, 296; b) siehe auch K. Madan, D. J. Cram, *ibid.* 1975, 427; J. W. H. M. Uiterwijk, S. Harkema, J. Geevers, D. N. Reinhoudt, *ibid.* 1982, 200.
- [50] a) F. Vögtle, H. Sieger, W. M. Müller, *Top. Curr. Chem.* 98 (1981) 107; b) K. Saigo, Kagaku to Kogyo (Osaka) 35 (1982) 90; c) J.-L. Pierre,

- P. Baret, *Bull. Soc. Chim. Fr.* II 1983, 367; d) E. Kimura, *Top. Curr. Chem.* 128 (1985) 113; e) F.P. Schmidtchen, *ibid.* 132 (1986) 101.
- [51] a) J.-M. Lehn, E. Sonveaux, A.K. Willard, *J. Am. Chem. Soc.* 100 (1978) 4914; b) B. Dietrich, J. Guilhem, J.-M. Lehn, C. Pascard, E. Sonveaux, *Helv. Chim. Acta* 67 (1984) 91; c) bezüglich anderer makrocyclischer Rezeptoren siehe auch: M.W. Hosseini, Thèse de Doctorat-ès-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1983.
- [52] C.H. Park, H. Simmons, *J. Am. Chem. Soc.* 90 (1968) 2431.
- [53] a) B. Dietrich, M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, R.B. Sessions, *J. Am. Chem. Soc.* 103 (1981) 1282; b) *Helv. Chim. Acta* 68 (1985) 289.
- [54] J. Cullinane, R.I. Gelb, T.N. Margulis, L.J. Zompa, *J. Am. Chem. Soc.* 104 (1982) 3048; E. Suet, H. Handel, *Tetrahedron Lett.* 25 (1984) 645.
- [55] M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, M.P. Mertes, *Helv. Chim. Acta* 66 (1983) 2454.
- [56] E. Kimura, M. Kodama, T. Yatsunami, *J. Am. Chem. Soc.* 104 (1982) 3182; J.F. Marecek, C.J. Burrows, *Tetrahedron Lett.* 27 (1986) 5943.
- [57] M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 70 (1987) 1312; siehe auch R.J.P. Williams, *J. Chem. Soc. Faraday Trans 1* 83 (1987) 1885.
- [58] B. Dietrich, D.L. Fyles, T.M. Fyles, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 62 (1979) 2763.
- [59] B. Dietrich, T.M. Fyles, J.-M. Lehn, L.G. Pease, D.L. Fyles, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1978, 934.
- [60] M.J. Mann, N. Pant, A.D. Hamilton, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 158.
- [61] F. Peter, M. Gross, M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *J. Electroanal. Chem.* 144 (1983) 279.
- [62] E. Garcia-España, M. Micheloni, P. Paoletti, A. Bianchi, *Inorg. Chim. Acta* 102 (1985) L9; A. Bianchi, E. Garcia-España, S. Mangani, M. Micheloni, P. Orioli, P. Paoletti, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1987, 729.
- [63] M.F. Manfrin, L. Moggi, V. Castelvetro, V. Balzani, M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 6888.
- [64] J.-M. Lehn, *Pure Appl. Chem.* 52 (1980) 2441.
- [65] J.-M. Lehn, J. Simon, J. Wagner, *Angew. Chem.* 85 (1973) 621, 622; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 12 (1973) 578, 579.
- [66] R.J. Motekaitis, A.E. Martell, B. Dietrich, J.-M. Lehn, *Inorg. Chem.* 23 (1984) 1588; R.J. Motekaitis, A.E. Martell, I. Murase, *ibid.* 25 (1986) 938; A. Evers, R.D. Hancock, I. Murase, *ibid.* 25 (1986) 2160; D.E. Whitmoyer, D.P. Rillema, G. Ferraudi, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 677.
- [67] J.-P. Kintzinger, J.-M. Lehn, E. Kauffmann, J.L. Dye, A.I. Popov, *J. Am. Chem. Soc.* 105 (1983) 7549.
- [68] D. Heyer, J.-M. Lehn, *Tetrahedron Lett.* 27 (1986) 5869.
- [69] T. Fujita, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [70] T.P. Lybrand, J.A. McCammon, G. Wipff, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83 (1986) 833.
- [71] J.-M. Lehn in K.J. Laidler (Hrsg.): *IUPAC Frontiers of Chemistry*, Pergamon Press, Oxford 1982, S. 265.

- [72] J. Jazwinski, J.-M. Lehn, D. Lilienbaum, R. Ziessel, J. Guilhem, C. Pascard, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1987, 1691.
- [73] A. Carroy, J.-M. Lehn, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 1232.
- [74] J. Comarmond, B. Dietrich, J.-M. Lehn, R. Louis, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1985, 74.
- [75] Y. Okuno, K. Uoto, O. Yonemitsu, T. Tomohiro, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1987, 1018; J.R. Holmes, J.-M. Lehn, in *Bearbeitung*.
- [76] F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, P. Vierling, *Tetrahedron Lett.* 21 (1980) 941.
- [77] F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, K. Saigo, *J. Am. Chem. Soc.* 103 (1981) 4266.
- [78] C. Pascard, C. Riche, M. Cesario, F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1982, 557.
- [79] J.-P. Kintzinger, F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, A. Pagelor, K. Saigo, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1981, 833.
- [80] M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 104 (1991) 3525; *Helv. Chim. Acta* 69 (1986) 587.
- [81] a) F.P. Schmidtchen, *J. Am. Chem. Soc.* 108 (1986) 8249; b) J. Rebek, Jr., D. Nemeth, P. Ballester, F.-T. Lin, *ibid.* 109 (1987) 3474.
- [82] J.-M. Lehn, J. Simon, A. Moradpour, *Helv. Chim. Acta* 61 (1978) 2407.
- [83] a) F.P. Schmidtchen, *J. Org. Chem.* 51 (1986) 5161; b) J. Simon, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1976; siehe auch 28 in [14] S. 305; c) J. Rebek, Jr., B. Askew, O. Nemeth, K. Parris, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 2432.
- [84] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 98 (1976) 1743.
- [85] F. Cramer: *Einschlußverbindungen*, Springer, Berlin 1954; M.L. Bender, M. Komiyama: *Cyclodextrin Chemistry*, Springer, Berlin 1978.
- [86] a) J. Franke, F. Vögtle, *Top. Curr. Chem.* 132 (1986) 137; b) F. Vögtle, W.M. Müller, W.H. Watson, *ibid.* 125 (1984) 131; c) bezüglich der Calixarene siehe C.D. Gutsche, *ibid.* 123 (1984) 1; *Acc. Chem. Res.* 16 (1983) 161; d) bezüglich der Cavitanden siehe D.J. Cram, *Science* 219 (1983) 1177.
- [87] J. Canceill, A. Collet, J. Gabard, F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 65 (1982) 1894.
- [88] M. Dhaenens, L. Lacombe, J.-M. Lehn, J.-P. Vigneron, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1984, 1097.
- [89] H.-J. Schneider, D. Güttes, U. Schneider, *Angew. Chem.* 98 (1986) 635; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 25 (1986) 647.
- [90] B.L. Allwood, F.H. Kohnke, J.F. Stoddart, D.J. Williams, *Angew. Chem.* 97 (1985) 584; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 24 (1985) 581.
- [91] Bezüglich dissymmetrischer zylindrischer makrotricyclischer Corezeptoren, die Ammonium-Ionen binden, siehe A.D. Hamilton, P. Kazanjian, *Tetrahedron Lett.* 26 (1985) 5735; K. Saigo, R.-J. Lin, M. Kubo, A. Youda, M. Hasegawa, *Chem. Lett.* 1986, 519.
- [92] Bezüglich makrocyclischer cyclophanartiger Rezeptoren siehe auch a) K. Odashima, T. Soga, K. Koga, *Tetrahedron Lett.* 21 (1980) 5311; b) F. Diederich, K. Dick, *J. Am. Chem. Soc.* 106 (1984) 8024, *zit. Lit.*

- [93] A.J. Blacker, J. Jazwinski, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 70 (1987) 1.
- [94] I. Bidd, B. Dilworth, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [95] J. Jazwinski, A.J. Blacker, J.-M. Lehn, M. Cesario, J. Guilhem, C. Pascard, *Tetrahedron Lett.* 28 (1987) 6057.
- [96] J.-M. Lehn, F. Schmidt, J.-P. Vigneron, *Tetrahedron Lett.* 29 (1988) 5255.
- [97] A.J. Blacker, M. W. Hosseini, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [98] a) J.-P. Behr, J.-M. Lehn, unveröffentlicht; b) J.-M. Lehn, I. Stibor, unveröffentlicht; c) bezüglich neuerer Beispiele siehe J. Rebek, Jr., B. Askwew, P. Ballester, C. Buhr, S. Jones, D. Nemeth, K. Williams, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 5033; A.D. Hamilton, D. Van Engen, *ibid.* 109 (1987) 5035.
- [99] J. Canceill, M. Cesario, A. Collet, C. Riche, C. Pascard, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 339; J. Canceill, L. Lacombe, A. Collet, *C.R. Acad. Sci. Ser. 2 Paris* 304 (1987) 815.
- [100] A.D. Hamilton, J.-M. Lehn, J.L. Sessler, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1984, 311; *J. Am. Chem. Soc.* 108 (1986) 5158.
- [101] Bezüglich anderer Metallorezeptor-ähnlicher Spezies siehe z.B. Zitate in [15]; N.M. Richards, I.O. Sutherland, P. Camilleri, J.A. Pape, *Tetrahedron Lett.* 26 (1985) 3739; M.C. Gonzalez, A.C. Weedon, *Can. J. Chem.* 63 (1985) 602; D.H. Busch, C. Cairns in [9], S. 1; V. Thanabal, V. Krishnan, *J. Am. Chem. Soc.* 104 (1982) 3643; G.B. Maiya, V. Krishnan, *Inorg. Chem.* 24 (1985) 3253.
- [102] a) K. Breslow, *Science* 218 (1982) 532 und [21], Vol. 3, S.473; b) R.M. Kellogg, *Top. Curr. Chem.* 101 (1982) 111; c) I. Tabushi, K. Yamamura, *ibid.* 113 (1983) 145; d) Y. Murakami, *ibid.* 115 (1983) 107; e) C. Sirlin, *Bull. Soc. Chim. Fr. II* 1984, 5; f) R.M. Kellogg, *Angew. Chem.* 96 (1984) 769; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 23 (1984) 782; g) V.T. D'Souza, M. Bender, *Acc. Chem. Res.* 20 (1987) 146.
- [103] J.-M. Lehn, *Pure Appl. Chem.* 51 (1979) 979; *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 471 (1986) 41.
- [104] Y. Chao, G.R. Weisman, G.D.Y. Sogah, D.J. Cram, *J. Am. Chem. Soc.* 101 (1979) 4948.
- [105] J.-M. Lehn, C. Sirlin, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1978, 949; *New J. Chem.* 11 (1987) 693.
- [106] S. Sasaki, K. Koga, *Heterocycles* 12 (1979) 1305.
- [107] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1978, 143.
- [108] J.-M. Lehn, T. Nishiya, *Chem. Lett.* 1987, 215.
- [109] M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, L. Maggiora, K.A. Mertes, M.P. Mertes, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 537.
- [110] G.M. Blackburn, G.R.J. Thatcher, M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *Tetrahedron Lett.* 28 (1987) 2779.
- [111] M.W. Hosseini, J.-M. Lehn, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1985, 1155; *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 7047.
- [112] P.G. Yohannes, M.P. Mertes, K.B. Mertes, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 8288.

- [113] S. Sasaki, M. Shionoya, K. Koga, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 3371.
- [114] H.-D. Lutter, F. Diederich, *Angew. Chem.* 98 (1986) 1125; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 25 (1986) 1125.
- [115] F.M. Menger, M. Ladika, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 3145.
- [116] E.T. Kaiser, D.S. Lawrence, *Science (Washington)* 226 (1984) 505.
- [117] Siehe beispielsweise A.R. Fersht, J.P. Shi, A.J. Wilkinson, D.M. Blow, P. Carter, M.M.Y. Waye, G.P. Winter, *Angew. Chem.* 96 (1984) 455; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 23 (1984) 467; J.A. Gerlt, *Chem. Rev.* 87 (1987) 1079; A.J. Russell, A.R. Fersht, *Nature (London)* 328 (1987) 496.
- [118] A. Tramontano, K.D. Janda, R.A. Lerner, *Science (Washington)* 234 (1986) 1566; S.J. Pollack, J.W. Jacobs, P.G. Schultz, *ibid.* 234 (1986) 1570; R.A. Lerner, A. Tramontano, *Trends Biochem. Sci.* 12 (1987) 427.
- [119] Selektiver Kationen-Transport war eines unserer ersten Ziele bei der Untersuchung von Cryptaten; siehe [29a, 125].
- [120] J.-M. Lehn in G. Spach (Hrsg.): *Physical Chemistry of Transmembrane Ion Motions*, Elsevier, Amsterdam 1983, S. 181.
- [121] W. Simon, W.E. Morf, P.C. Meier, *Struct. Bonding (Berlin)* 16 (1973) 113.
- [122] W.E. Morf, D. Amman, R. Bissig, E. Pretsch, W. Simon in [19], Vol. 1, S. 1.
- [123] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 95 (1973) 6108.
- [124] J.D. Lamb, J.J. Christensen in [21], Vol. 3, S. 571.
- [125] M. Kirch, J.-M. Lehn, *Angew. Chem.* 87 (1975) 542; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 14 (1975) 555; M. Kirch, Thèse de Doctorat-ès-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1980.
- [126] J.-P. Behr, M. Kirch, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 241.
- [127] T.M. Fyles, *Can. J. Chem.* 65 (1987) 884.
- [128] M. Castaing, F. Morel, J.-M. Lehn, *J. Membr. Biol.* 89 (1986) 251; M. Castaing, J.-M. Lehn, *ibid.* 97 (1987) 79.
- [129] E. Bacon, L. Jung, J.-M. Lehn, *J. Chem. Res. (S)* 1980, 136.
- [130] H. Tsukube, *Angew. Chem.* 94 (1982) 312; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 21 (1982) 304; *Angew. Chem. Suppl.* 1982, 575.
- [131] Anionen-Transport mit Anion-Cryptanden ist kürzlich beobachtet worden: T.M. Fyles, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [132] A. Harada, S. Takahashi, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1987, 527.
- [133] J.J. Grimaldi, J.-M. Lehn, *J. Am. Chem. Soc.* 101 (1979) 1333.
- [134] S.S. Anderson, I.G. Lyle, R. Paterson, *Nature (London)* 259 (1976) 147.
- [135] J.J. Grimaldi, S. Boileau, J.-M. Lehn, *Nature (London)* 265 (1977) 229.
- [136] J.K. Hurst, D.H.P. Thompson, *J. Membr. Sci.* 28 (1986), zit. Lit.; I. Tabushi, S.-i. Kugimiya, *Tetrahedron Lett.* 25 (1984) 3723.
- [137] M. Okahara, Y. Nakatsuji, *Top. Curr. Chem.* 128 (1985) 37.
- [138] A. Hriciga, J.-M. Lehn, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 80 (1983) 6426.
- [139] R. Frank, H. Rau, *Z. Naturforsch. A* 37 (1982) 1253.
- [140] I. Tabushi, S.-i. Kugimiya, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 1859.
- [141] S. Shinkai, O. Manabe, *Top. Curr. Chem.* 121 (1984) 67.
- [142] D.W. Urry, *Top. Curr. Chem.* 128 (1985) 175.

- [143] R. Nagaraj, P. Balaram, *Acc. Chem. Res.* 14 (1981) 356; R. O. Fox, Jr., F. M. Richards, *Nature (London)* 300 (1982) 325.
- [144] J.-P. Behr, J.-M. Lehn, A.-C. Dock, D. Moras, *Nature (London)* 295 (1982) 526.
- [145] U. F. Kragten, M. F. M. Roks, R. J. M. Nolte, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1985, 1275.
- [146] I. Tabushi, Y. Kuroda, K. Yokota, *Tetrahedron Lett.* 23 (1982) 4601.
- [147] J.-H. Fuhrhop, U. Liman, *J. Am. Chem. Soc.* 106 (1984) 4643.
- [148] J.-H. Fuhrhop, U. Liman, H. H. David, *Angew. Chem.* 97 (1985) 337; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 24 (1985) 339.
- [149] J.-M. Lehn, J. Simon; *Helv. Chim. Acta* 60 (1977) 141.
- [150] J.-M. Lehn, M. E. Stubbs, *J. Am. Chem. Soc.* 96 (1974) 4011.
- [151] W. Fischer, J. Brickmann, P. Luger, *Biophys. Chem.* 13 (1981) 105.
- [152] C. Etchebest, S. Ranganathan, A. Pullman, *FEBS Lett* 173 (1984) 301.
- [153] Frühere Anwendung des Symbols für Durchschnitt: E. Kauffmann, J. L. Dye, J.-M. Lehn. A. I. Popov, *J. Am. Chem. Soc.* 102 (1980) 2274.
- [154] A. G. Amit, R. A. Mariuzza, S. E. V. Phillips, R. J. Poljak, *Science (Washington)* 233 (1986) 747; H. M. Geysen, J. A. Tainer, S. J. Rodda, T. J. Mason, H. Alexander, E. D. Getzoff, R. A. Lerner, *ibid.* 235 (1987) 1184.
- [155] M. M. Harding, J.-M. Lehn, unveröffentlicht.
- [156] D. A. Tomalia, M. Hall, D. M. Hedstrand, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 1601. zit. Lit.
- [157] G. R. Newkome, Z.-q. Yao, G. K. Baker, V. K. Gupta, P. S. Russo, M. J. Saunders, *J. Am. Chem. Soc.* 108 (1986) 849; G. R. Newkome, G. R. Baker, M. J. Saunders, P. S. Russo, V. K. Gupta, Z.-q. Yao, J. E. Miller, K. Bouillion, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 752.
- [158] H. M. McConnell, L. K. Tamm, R. M. Weiss, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 81 (1984) 3249; R. M. Weiss, H. M. McConnell, *Nature (London)* 310 (1984) 47.
- [159] T. Kunitake, Y. Okahata, M. Shimomura, S.-i. Yasunami, K. Takarabe, *J. Am. Chem. Soc.* 103 (1981) 5401; N. Nakashima, S. Asakuma, T. Kunitake, *ibid.* 107 (1985) 509.
- [160] J. H. Fendler, *Membrane Mimetic Chemistry*, Wiley, New York 1982.
- [161] H. Kuhn, D. Moebius, *Angew. Chem.* 83 (1971) 672; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 10 (1971) 620.
- [162] D. Moebius, *Acc. Chem. Res.* 14 (1981) 63; *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 82 (1978) 848; *Z. Phys. Chem. (Munich)* 154 (1987) 121.
- [163] J. A. Hayward (Hrsg.): *New Technological Applications of Phospholipid Bilayers. Thin Films and Vesicles*, Plenum Press, London 1986.
- [164] J. Sagiv in [163]; L. Netzer, J. Sagiv, *J. Am. Chem. Soc.* 105 (1983) 674.
- [165] H.-H. Hub, B. Hupfer, H. Koch, H. Ringsdorf, *Angew. Chem.* 92 (1980) 962; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 19 (1980) 938; L. Gros, H. Ringsdorf, H. Schupp, *ibid.* 93 (1981) 311 bzw. 20 (1981) 305; siehe auch: H. Ringsdorf, B. Schlarb, J. Venzmer, *ibid.* 100 (1988) 117 bzw. 27 (1988) Nr. 1.

- [166] G. Wegner, *Chimia* 36 (1982) 63; C.M. Paleos, *Chem. Soc. Rev.* 14 (1985) 45.
- [167] H. Kuhn, *Pure Appl. Chem.* 53 (1981) 2105.
- [168] a) J.-H. Fuhrhop, J. Mathieu, *Angew. Chem.* 96 (1984) 124; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 23 (1984) 100; b) J.-H. Fuhrhop, D. Fritsch, *Acc. Chem. Res.* 19 (1986) 130; c) Y. Okahata, *ibid.* 19 (1986) 57.
- [169] a) V. Balzani (Hrsg.): *Supramolecular Photochemistry*. Reidel, Dordrecht, Niederlande 1987; b) J.-M. Lehn in [169a], S. 29.
- [170] J.-C. Rodriguez-Ubis, B. Alpha, D. Plancherel, J.-M. Lehn, *Helv. Chim. Acta* 67 (1984) 2264.
- [171] B. Alpha, J.-M. Lehn, G. Mathis, *Angew. Chem.* 99 (1987) 259; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 26 (1987) 266; B. Alpha, V. Balzani, J.-M. Lehn, S. Perathoner, N. Sabbatini, *ibid.* 99 (1987) 1310 bzw. 26 (1987) 1266; N. Sabbatini, S. Perathoner, V. Balzani, B. Alpha, J.-M. Lehn in [169a], S. 187.
- [172] a) H. Bouas-Laurent, A. Castellán, J.-P. Desvergne, *Pure Appl. Chem.* 52 (1980) 2633; b) H. Bouas-Laurent, A. Castellán, M. Daney, J.-P. Desvergne, G. Guinand, P. Marsau, M.-H. Riffaud, *J. Am. Chem. Soc.* 108 (1986) 315.
- [173] J.P. Konopelski, F. Kotzyba-Hibert, J.-M. Lehn, J.-P. Desvergne, F. Fagès, A. Castellán, H. Bouas-Laurent, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1985, 433.
- [174] D.F. Eaton, *Tetrahedron* 43 (1987) 1551, zit. Lit.
- [175] A. Guarino, *J. Photochem.* 35 (1986) 1.
- [176] M. Gubelmann, J.-M. Lehn, J.L. Sessler, A. Harriman, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* (1988) 77.
- [177] V. Balzani, N. Sabbatini, F. Scandola, *Chem. Rev.* 86 (1986) 319.
- [178] Photoaktive Einheiten können komplexierte Substrate [93] photooxidieren und DNA-Photospaltung bewirken: A.J. Blacker, J. Jazwinski, J.-M. Lehn, F.-X. Wilhelm, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1986, 1035.
- [179] a) D.S. Chemla, J. Zyss (Hrsg.): *Non-linear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals*, Vol. 1, Academic Press, New York 1987; b) J.-M. Lehn in [179a], S. 215; c) J.F. Nicoud, R.J. Twieg in [179a], S. 221.
- [180] M. Takagi, K. Ueno, *Top. Curr. Chem.* 121 (1984) 39; H.-G. Löhr, F. Vögtle, *Acc. Chem. Res.* 18 (1985) 65; R. Klink, D. Bodart, J.-M. Lehn, B. Helfert, R. Bitsch, *Eur. Pat. Apl.* 83100281.1 (14. Januar 1983), Merck GmbH.
- [181] R.C. Haddon, A.A. Lamola, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 82 (1985) 1874; R.W. Munn, *Chem. Br.* 1984, 518; J. Simon, J.-J. André, A. Skoulios, *Nouv. J. Chim.* 10 (1986) 295; J. Simon, F. Tournilhac, J.-J. André, *New J. Chem.* 11 (1987) 383, zit. Lit. Bezüglich verwandter Arbeiten siehe beispielsweise: J. K. Nagle, J. S. Bernstein, R. C. Young, T. J. Meyer, *Inorg. Chem.* 20 (1981) 1760; E.T.T. Jones, O.M. Chyan, M.S. Wrigh-ton, *J. Am. Chem. Soc.* 109 (1987) 5526.

- [182] T. S. Arrhenius, M. Blanchard-Desce, M. Dvolaitzky, J.-M. Lehn, J. Malthête. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 83 (1986) 5355.
- [183] Biologische Effektoren dürften auch erstrebenswert sein: I. Tabushi, T. Nishiya, M. Shimomura, T. Kunitake, H. Inokuchi, T. Yagi, *J. Am. Chem. Soc.* 106 (1984) 219.
- [184] R. Schwyzer, A. Tun-Kyi, M. Caviczal, P. Moser, *Helv. Chim. Acta* 53 (1970) 577; *Experientia* 26 (1970) 577; siehe auch [1], S. 19.
- [185] a) S. Shinkai, *Pure Appl. Chem.* 59 (1987) 425; b) D.A. Gustowski, M. Delgado, V.J. Gatto, L. Echegoyen, G.W. Gokel, *J. Am. Chem. Soc.* 108 (1986) 7553, zit. Lit.
- [186] J.-M. Lehn, J. Malthête, A.-M. Levelut, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1985, 1794.
- [187] Von Phthalocyanin abgeleitete columnare Mesophasen: D. Masurel, C. Sirlin, J. Simon, *New J. Chem.* 11 (1987) 455, zit. Lit.
- [188] E. Carafoli, J.T. Penniston, *Sci. Am.* 253 (1985) Nr. 11, S. 50; *Spektrum Wiss.* 1986, Nr. 1, S. 76; T. Hiraoki, H.J. Vogel, *J. Cardiovasc. Pharm.* 10 (Suppl. 1 (1987)) S 14.
- [189] I. Tabushi, S.-i. Kugimiya, T. Sasaki, *J. Am. Chem. Soc.* 107 (1985) 5159, zit. Lit.
- [190] D. Pörschke, M. Eigen, *J. Mol. Biol.* 62 (1971) 361, zit. Lit.
- [191] J.-M. Lehn, A. Rigault, J. Siegel, J. Harrowfield, B. Chevrier, D. Moras, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 84 (1987) 2565; J.-M. Lehn, A. Rigault, unveröffentlicht.
- [192] K.E. Drexler, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 78 (1981) 5275; C. Joachim, J.-P. Launay, *Nouv. J. Chim.* 8 (1984) 723.
- [193] *Opportunities in Chemistry (»Pimentel-Report«)*, National Academy Press, Washington DC, USA, S. 219f.

Walter Steurer

Quasikristalle und verbotene Symmetrien¹

Es ist und bleibt ein kristallographisches Gesetz, dass fünfzählige Rotationssymmetrie und dreidimensionale (3D-)Gitterperiodizität inkompatibel sind. Darum traute auch der israelische Materialwissenschaftler Dan Shechtman seinen Augen kaum, als er Elektronenbeugungsaufnahmen rasch abgeschreckter Aluminium-Mangan-Proben sichtete. Statt Beugungsbildern mit scharfen Bragg-Reflexen und kristallographischer Beugungssymmetrie 1, 2, 3, 4 oder 6 oder auch nur diffusen Ringen, die auf ein metallisches Glas hinviesen, sah er das kristallographisch scheinbar Unmögliche: zehnzählige Rotationssymmetrie und gleichzeitig scharfe Bragg-Reflexe, also einen klaren Hinweis auf Gitterperiodizität. Shechtman sah sich, von dieser Beobachtung verblüfft, die Beugungssymmetrie näher an und identifizierte sie als ikosaedrisch (Abb. 1 und 2).

Seine Kollegen vom *National Institute of Standards NIST* in Gaithersburg, Maryland, wo er (von seiner Heiminstitution, dem Technion in Haifa/Israel beurlaubt) arbeitete, waren skeptisch. Ihre Reaktion war derjenigen des herausragenden Metallurgen John W. Cahn ähnlich: »Ach lass das, Dany. Das sind Zwillinge, und das ist nicht sonderlich interessant«.^[2] In der Tat ist Verzwillingung ein häufig beobachtetes Phänomen. Sogar so einfache Metalle wie Silber können ikosaedrische Zwillinge bilden, die ikosaedrische Beugungssymmetrie vortäuschen (ein Übersichtsartikel zu fünffacher Verzwillingung: Lit. [3]).

1 Walter Steurer: Quasikristalle – Schnitte durch den Hyperraum. *Angewandte Chemie* 2011, Vol. 123, S. 10965–68. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.

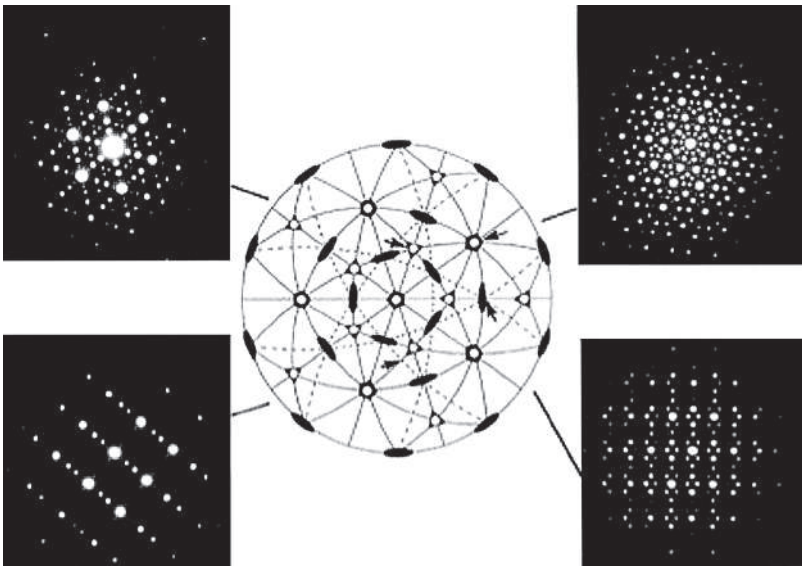


Abbildung 1: Elektronenbeugungsbilder von quasikristallinem Aluminium-Mangan in unterschiedlichen Blickrichtungen, auf ikosaedrische Beugungssymmetrie hinweisend. Reprinted with permission from Lit. [1]. Copyright (1984) by the American Physical Society.

Hitzige Auseinandersetzungen

Shechtman konnte seine unerwarteten Beobachtungen nicht vor November 1984 publizieren.^[1] Drei Koautoren unterstützten ihn dabei: John W. Cahn, der seine Meinung geändert hatte, nachdem der französische Kristallograph Denis Gratias, nun ebenfalls Koautor, Shechtmans Experimente bestätigt hatte; Ilan Blech vom Technion trug mit seiner Interpretation der Beugungsbilder als »Zufallspackung nicht überlappender, paralleler, kantenverknüpfter Ikosaeder« bei. In ihrem Artikel hatten die Autoren explizit zu formulieren, dass Kristalle nie und nimmermehr ikosaedrische Punktgruppensymmetrie haben könnten.

In den ersten Jahren gab es zahlreiche Skeptiker, mit dem Doppel-Nobelpreisträger Linus Pauling als prominentestem Vertreter, die sich weigerten, die Existenz dieser neuartigen Strukturordnung anzuerkennen.

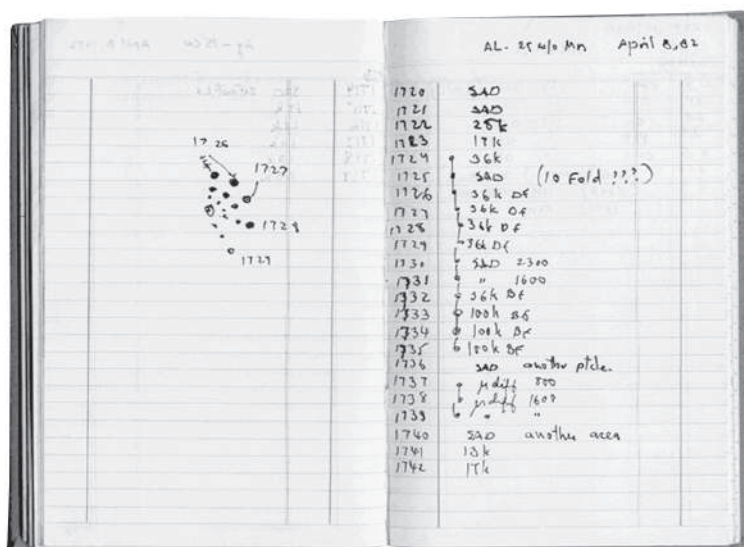


Abbildung 2: Dan Shechtmans Notizen vom 8. April 1982; der Hinweis auf zehnzählige Symmetrie ist mit drei Fragezeichen versehen.

»Die scheinbar ikosaedrische Symmetrie ist Resultat einer Vielfachverzwillingung kubischer Kristalle«,^[4] war ihr Mantra. Um der steigenden Qualität der Quasikristalle und ihrer Beugungsbilder gerecht zu werden, musste Pauling jedoch zu immer größeren Elementarzellen in seinem Zwillingsmodell greifen; von ursprünglich 1.120 Atomen pro Elementarzelle^[4] gelangte er bis zu beachtlichen 19.400.^[5]

Vorläufer

Im Rückblick ist es schwer nachzuvollziehen, warum es zur vollen Akzeptanz dieses neuen Ordnungszustands der Materie so viel Zeit benötigte. Bereits 1974 hatte ja der britische Mathematiker Roger Penrose quasiperiodische Parkettierungen mit fünfzähliger Orientierungssymmetrie diskutiert.^[6] Martin Gardner popularisierte dann drei Jahre später diese Parkettierungen in seiner Kolumne *Mathematical Games* in der Zeitschrift *Scientific American*.^[7] Der britische Kristallograph

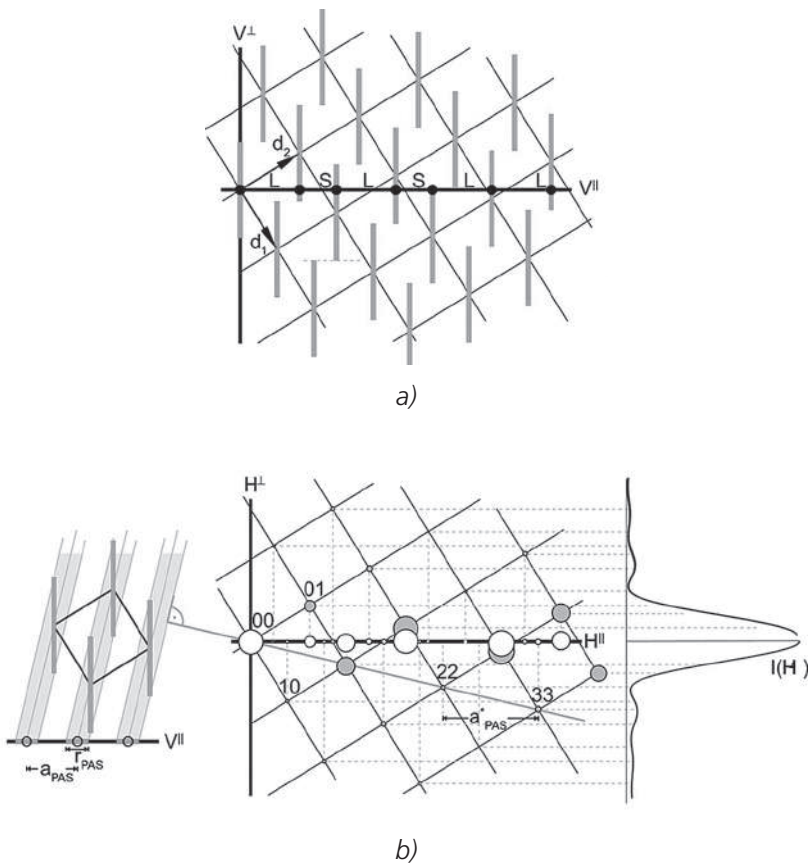


Abbildung 3: 1D-Fibonacci-Sequenz (FS) ...LSLSLL... in der 2D-Beschreibung: a) Die FS entsteht als Schnitt des 2D-Hyperkristalls mit dem physikalischen Raum V^I , b) seine Fourier-transformierte (Beugungsbild) als Projektion auf den physikalischen reziproken Raum H^I .

Alan L. Mackay war der Erste, der sich Kristallstrukturen auf Grundlage dieser Penrose-Parkettierungen ausmalte. Er führte sogar optische Beugungsexperimente durch, die zum ersten Mal zehnzählige Symmetrie und scharfe Bragg-Reflexe zeigten.^[8] Paul J. Steinhard und sein Mitarbeiter Dov Levine kannten diese Arbeiten und publizierten die Grundlagen einer ersten Theorie der Quasikristalle^[9] nur sechs Wochen später als Shechtman.^[1]

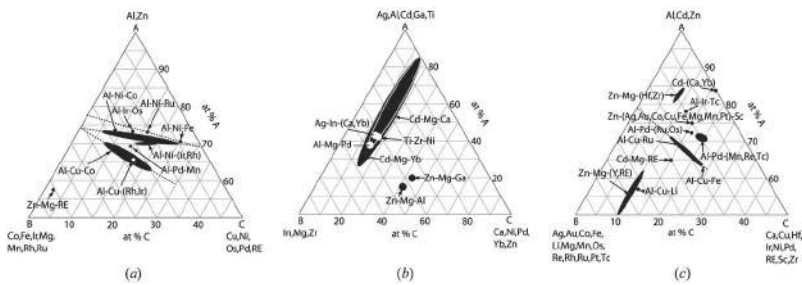


Abbildung 4: Stabilitätsbereiche von dekadonalen (a) und ikosaedrischen Quasikristallen (b und c). RE bedeutet Lanthanoiden. Nur die A-reichen Teile der Konzentrationsdiagramme sind gezeigt (Wiedergabe aus Lit. [12]).

Höherdimensionale Beschreibung

Wie lässt sich nun die scheinbare Verletzung kristallographischer Gesetze, also die Anordnung scharfer Bragg-Reflexe in ikosaedrischer Beugungssymmetrie, erklären? Bereits 1949 hatte der deutsche Kristallograph Carl Hermann die möglichen Punktsymmetrien von höherdimensionalen Gittern diskutiert.^[10] Er fand, dass fünfzählige und ikosaedrische Symmetrien kompatibel mit 4D- bzw. 6D-Hypergittern sind. Betrachtet man nun das 3D-Beugungsbild eines Quasikristalls als Projektion aus dem 6D-reziproken Raum, dann ergibt sich die Quasikristallstruktur als 3D-Schnitt der entsprechenden 6D-Hyperkristallstruktur. Diese heute allgemein verwendete Methode wurde erstmals vom niederländischen Mathematiker Nicolas G. de Bruijn auf quasiperiodische Strukturen angewendet, als er Konstruktionsregeln für die Penrose-Parkettierung definierte.^[11] Das Prinzip ist in Abbildung 3 am Beispiel der 1D-quasiperiodischen Fibonacci-Sequenz (FS) veranschaulicht.

Vorkommen

Quasikristalle sind binäre oder ternäre Phasen, die bisher in über fünfzig intermetallischen Systemen beobachtet wurden (Abb. 4). Häufig

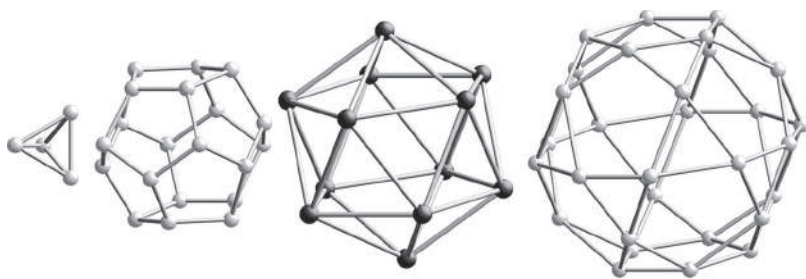


Abbildung 5: Schalenstruktur des $\text{Cd}_4\text{Yb}_{12}$ -Tsai-Clusters (Cd: helle Kugeln, Yb: dunkle Kugeln).

werden sie von Approximanten begleitet, die aus den gleichen Strukturereinheiten (Clustern^[13]) aufgebaut sind wie die Quasikristalle (Abb. 5).

Die meisten stabilen Quasikristalle zeigen entweder ikosaedrische oder dekadagonale Beugungssymmetrie und können mit Standardmethoden genauso perfekt gezüchtet werden wie andere Metalkristalle auch. Kürzlich wurden quasiperiodische Strukturen auch in selbstorganisierten kolloidalen Systemen gefunden, sowohl mit 12- als auch mit 18-zähliger Symmetrie (siehe z.B. Lit. [14], zit. Lit.).

Struktur, Eigenschaften und Anwendungen

Ein einfaches Modell einer 2D-quasiperiodischen Struktur erhält man durch geeignete Dekoration einer quasiperiodischen Parkettierung. Ein solches Modell ist gar nicht so weit weg von der Realität, wie man am Beispiel eines dekadagonalen Quasikristalls im ternären System Aluminium-Kobalt-Nickel Al-Co-Ni in Abbildung 6 erkennen kann.

Allgemein kann man quasiperiodische Strukturen als Packungen von teilweise überlappenden Clustern mit nichtkristallographischer Symmetrie beschreiben. Man kann zeigen, dass die effizienteste Packung unter Beibehaltung der Clustersymmetrie die quasiperiodische ist.^[15, 16] Des Weiteren fügen sich dann auch strukturelle Untereinheiten der Cluster exakt aneinander und bilden ein Netzwerk von einander durchdringenden Atomebenen, das sich über den gesamten Kristall erstreckt (Abb. 7).^[17]

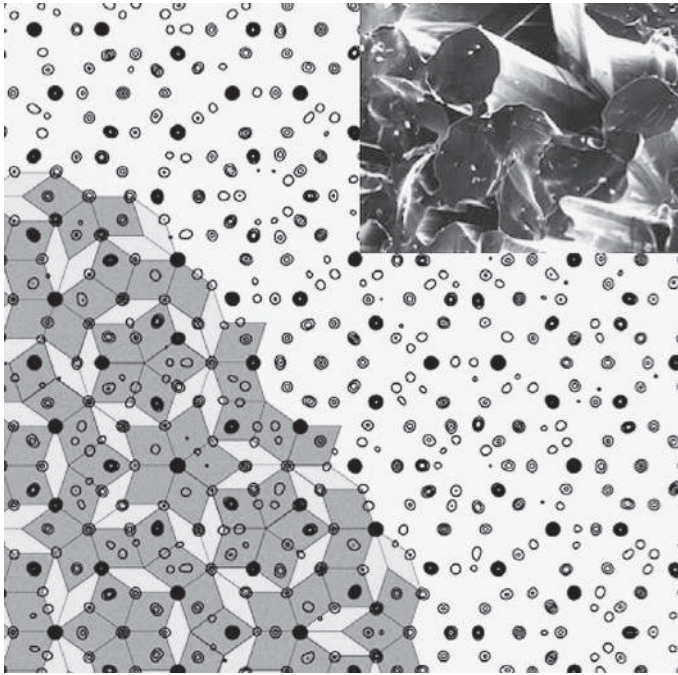


Abbildung 6: Projizierte Elektronendichteverteilungsfunktion von dekadagonalem Al-Co-Ni mit darunterliegender Penrose-Parkettierung. Oben rechts sind einige miteinander verwachsene dekaprismatrische Quasikristalle abgebildet.

Seltsame Strukturen können Ursprung seltsamer Eigenschaften sein. In der Tat haben Quasikristalle eine spezielle elektronische Struktur, die zu geringer elektrischer und thermischer Leitfähigkeit sowie zu einer niedrigen Oberflächenenergie führt. Bemerkenswerterweise ist die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit derjenigen normaler Metalle entgegengesetzt.

Bis jetzt kennt man lediglich Nischenanwendungen für Quasikristalle: wegen ihrer Antihafteigenschaften als Bratpfannenbeschichtungen sowie wegen ihrer Alterungsbeständigkeit und Härte in medizinischen Stählen. Mehr Informationen zu Anwendungen finden sich im Buch *Useful Quasicrystals*.^[18]

Die vielleicht vielversprechendsten Anwendungen zeichnen sich im Bereich der photonischen und phononischen Quasikristalle ab.^[19] Die

beliebig hohe Symmetrie ermöglicht die Erzeugung richtungsunabhängiger Bandlücken, sogar für Heterostrukturen mit nur niedrigem Kontrast; ihre Quasiperiodizität führt auch zu erhöhter Flexibilität im Bandlückendesign durch gezielte Defektinkorporation. Photonische Kristalle können in optischen Bauelementen im Bereich der Kommunikationsindustrie oder in optischen Computern Verwendung finden. Phononische Kristalle können (auf der Nanometerskala) als thermische Barrieren oder auch (auf der Meterskala) zum Lärmschutz eingesetzt werden.

Paradigmenwechsel

In einer Reihe von Lehrbüchern liest man immer noch, dass im thermodynamischen Gleichgewichtszustand alle einphasigen Festkörper kristallin sind, d.h. im zeitlichen und räumlichen Mittel 3D-Gitterperiodizität aufweisen. Die Entdeckung von inkommensurabel modulierten Strukturen und Kompositkristallen in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts hatte keinen wirklichen Einfluss auf diese klassische Sichtweise. Man konnte diese Fülle eben auch einfach als reguläre Verzerrungen und Verwachsungen periodischer Strukturen ansehen. Nach der Entdeckung der Quasikristalle waren diese Hilfskonstrukte zur Bewahrung der Periodizität jedoch nicht mehr anwendbar. Mit der Entdeckung der Quasikristalle wurde eine fundamental neue Art von Fernordnung begründet.

Der Ursprung der Quasiperiodizität ist immer noch nicht voll verstanden. Da quasiperiodische Ordnung in Materialien mit völlig unterschiedlichen Wechselwirkungspotentialen – von intermetallischen Phasen über Terpolymere zu selbstorganisierten Kolloiden – auftreten kann, muss es unterschiedliche Ordnungsmechanismen geben. Mehr und detailliertere Informationen zu allen Fragen der Quasikristalle sind im Buch *Crystallography of Quasicrystals*^[21] zu finden.

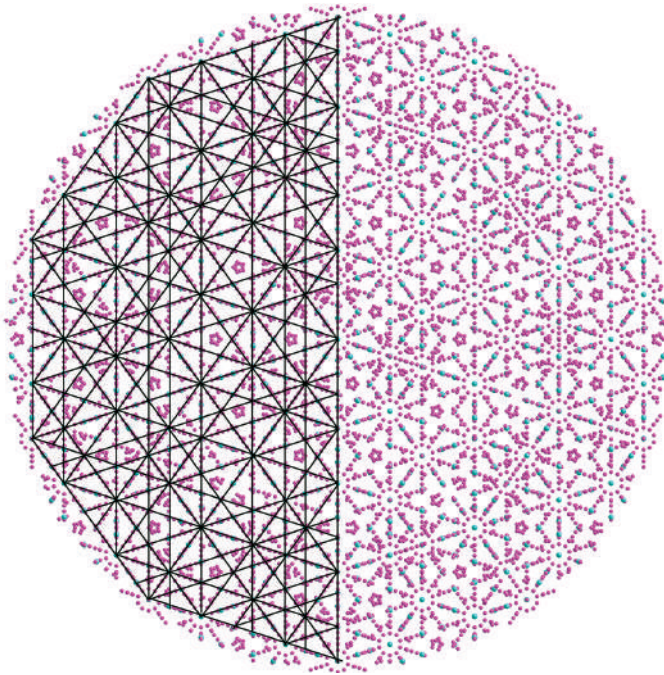


Abbildung 7: Projektion eines kugelförmigen Ausschnitts (Durchmesser 100 Å) der Struktur von ikosaedrischem Cd-Yb^[20] längs einer fünfzähligen Achse. Nahezu alle Atome sind in einem ikosaedrischen Netzwerk von Ebenen angeordnet. Die Atomebenen durchdringen einander auf eine nur in quasiperiodischen Strukturen mögliche Art und Weise.

Literatur

- [1] D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, J. W. Cahn, Physical Review Letters 1984, 53, S. 1951.
- [2] M. La Brecque, Mosaic 1987/8, 18, S. 2.
- [3] H. Hofmeister, Crystal Research and Technology 1998, 33, S. 3.
- [4] L. Pauling, Nature 1985, 317, S. 512.
- [5] L. Pauling, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 1989, 86, S. 8595.
- [6] R. Penrose, Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications 1974, 10, S. 266.
- [7] M. Gardner, Scientific American 1977, 236, S. 110.

- [8] A.L. Mackay, *Physica A – Statistical Mechanics and its applications* 1982, 114, S. 609.
- [9] D. Levine, P.J. Steinhardt, *Physical Review Letters* 1984, 53, S. 2477.
- [10] C. Hermann, *Acta Crystallographica Section A* 1949, 2, S. 139.
- [11] N.G. De Bruijn, *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen A* 1981, 84, S. 39.
- [12] W. Steurer, S. Deloudi, *Acta Crystallographica Section A* 2008, 64, S. 1.
- [13] C.L. Henley, M. de Boissieu, W. Steurer, *Philosophical Magazine* 2006, 86, S. 1131.
- [14] S. Fischer, A. Exner, K. Zielske, S. Förster, J. Perlich, S. Deloudi, W. Steurer, P. Lindner, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 2011, 108, S. 1810.
- [15] H.C. Jeong, P.J. Steinhardt, *Physical Review Letters* 1994, 73, S. 1943.
- [16] W. Steurer, S. Deloudi, *Structural Chemistry* 2011, DOI: 10.1007/s11224-011-9864-2.
- [17] W. Steurer, *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie* 2011, DOI: 10.1002/zaac.201100210.
- [18] J.M. Dubois, *Useful Quasicrystals*, Singapur (World Scientific) 2005.
- [19] Übersichtsartikel: W. Steurer, D. Sutter-Widmer, *Journal of Physics D* 2007, 40, R229.
- [20] H. Takakura, C.P. Gomez, A. Yamamoto, M. De Boissieu, A.P. Tsai, *Nature Materials* 2007, 6, S. 58.
- [21] W. Steurer, S. Deloudi, *Crystallography of Quasicrystals. Concepts, Methods and Structures*, Heidelberg (Springer) 2009 (Springer Series in Materials Science, Vol. 126).

Klaus Müllen, Martin Baumgarten und Randolph Schücke

Polymerelektronik

Organische Halbleiter für Alltags- und Hightechanwendungen¹

Unter Kunststoffen verstehen wir meist Polymere oder Plastik, also Makromoleküle, die zu isolierenden und formgebenden Materialien (z.B. Kabelummantelungen, Getränkeflaschen, Alltagsgegenständen) verarbeitet werden. Den Begriff des Halbleiters beschränken wir dagegen üblicherweise auf unedle Metalle, z.B. Silizium und Germanium. In den letzten zwanzig Jahren hat jedoch die Entwicklung leitfähiger Kunststoffe und halbleitender Polymere solche Fortschritte erzielt, dass eine gewisse Konkurrenzfähigkeit zu anorganischen Halbleitern auf Basis organischer Materialien entstand. Die Entdeckung des sprunghaften Anstiegs der Leitfähigkeit durch Dotieren (partielle Oxidation) in den 1970er Jahren führte zu weiteren Anstrengungen. Bereits 1987 erreichte man für dotiertes Polyacetylen Leitfähigkeiten so hoch wie für Kupfer (10^5 S/cm, Naarmann, BASF) und 1990 wurde die erste polymere lichtemittierende Diode (LED) publiziert (R. Friend, *University of Cambridge*). Für ihre grundlegenden Verdienste auf dem Gebiet der konjugierten Polymere wurden Alan J. Heeger, Alan G. McDiarmid und Hideki Shirakawa im Jahr 2000 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt.

Konjugierte Polymere

Kettenmoleküle mit beweglichen, leicht polarisierbaren Elektronen, so genannte konjugierte Polymere, können mit Licht und mit elektrischen Ladungen in Wechselwirkung treten. Es sind diese Eigenschaften, wel-

- 1 Der vorliegende Text basiert auf den Artikeln »Organische Halbleiter für die Elektronik« im Jahrbuch der Max-Planck-Gesellschaft 2009 und »Organische Halbleiter für Alltag und Hightech« in *Natur und Geist*, Forschungsmagazin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz 1/2009, S. 8 ff.

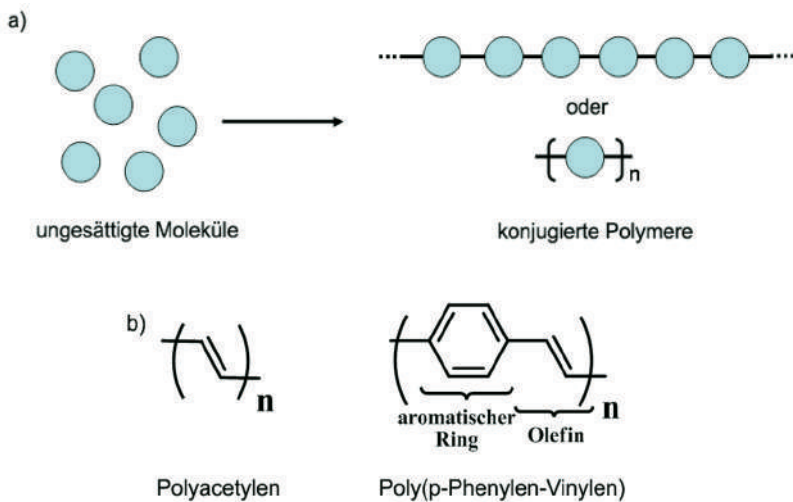


Abbildung 1: Polymerisation. A: Schematischer Aufbau. B: Konjugierte Polymere: Wiederholungseinheiten von Polyacetylen und Poly(p-Phenylen-Vinylen). Bildnachweis: Schücke/Müllen.

che die Rolle der konjugierten Polymere in der Elektronik und Optoelektronik begründen. Ihre elektrischen und optischen Eigenschaften hängen eng mit dem chemischen Aufbau zusammen. Die leitfähigen Polymere besitzen eine so genannte konjugierte Polymer-Hauptkette, die sich streng alternierend aus Einfach- und Doppelbindungen zusammensetzt (Abb. 1). Dieses ausgedehnte delokalisierte Elektronensystem ist die Ursache für die Halbleitereigenschaften.

Diese sind nicht auf langkettige Polymere beschränkt. Kleinere Einzelmoleküle mit ketten- oder scheibenförmigem Aufbau können ähnliche Eigenschaften besitzen. Der Hauptunterschied von kleinen Molekülen und Polymeren liegt in deren Verarbeitbarkeit. Kleine Moleküle werden normalerweise in einem Hochvakuumprozess auf Substratoberflächen aufgebracht, während (unverdampfbare) Makromoleküle aus Lösungen verfilmt werden. Letzteres ist vorteilhaft für eine schnelle und energie- wie kostengünstige Produktion. Die Polymerlösungen können als elektronische Druckertinte großflächig auf flexiblen Untergründen aufgedruckt werden, dem Zeitungsdrucken nicht unähnlich.

Polymerelektronik

Druckbare Schaltkreise aus leitfähigen Polymeren illustrieren den Gattungsbegriff dieser Funktionspolymere sehr gut. Daneben finden solche Materialien Einsatz als Leiterbahnen und Antennen in Funkchips (*radio frequency identification*, RFID), die für Informationsspeicherung und -übertragung genutzt werden. RFIDs werden bereits erfolgreich in der Palettenlagerhaltung eingesetzt, eine Verwendung im Einzelhandel anstelle des Strichcodes ist projektiert. Zusätzliche kommerzielle Anwendungen stellen auf dem *E-Ink*-Prinzip beruhende Lesegeräte für elektronische Dokumente dar. Diese sind aufgrund der verwendeten Komponenten im ganzen flexibel, leicht und bruchstabil. Sie erlauben das Mitführen und Betrachten von vielen Büchern, Zeitungen, Dokumenten und Präsentationen bei einem sehr geringen Gewicht. Wie bedrucktes Papier benötigen sie eine externe Beleuchtung.

Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz wird daran gearbeitet, maßgeschneiderte organische Funktionsmaterialien aus kleinen Molekülen, planaren ausgedehnten Kohlenwasserstoffen, konjugierten Polymeren und Dendrimeren für die verschiedensten Anwendungen zu synthetisieren.

Organische lichtemittierende Dioden (OLED)

Konjugierte Polymere in organischen LEDs (OLEDs) ermöglichen den Bau von flachen, energiesparenden Lichtelementen. Das Arbeitsprinzip einer Leuchtdiode besteht im Anlegen einer Spannung an die partiell lichtdurchlässigen Elektroden, sodass positive und negative Ladungsträger von den entsprechenden Elektroden aus in die elektrolumineszente Schicht wandern und dort rekombinieren, woraufhin Licht emittiert wird. (Abb. 2 a). OLEDs verbrauchen bis zu zwanzig Mal weniger Energie bei gleicher Lichtleistung als herkömmliche Glühlampen. Sie werden außer in Beleuchtungsmitteln in Handy- und Radiodisplays eingesetzt, Sony bietet den ersten OLED-Fernseher an.

Für alle Vollfarb- und Weißlichtanwendungen ist eine stabile blaue Emission die Schlüsselkomponente. Daher fokussieren sich die synthetischen Anstrengungen im Bereich der OLEDs auf blaue Emittiermaterialien, die auch eine lange Lebensdauer haben. In diesem Sinn wurden neue konjugierte Polymere synthetisiert wie das Polypyrenen

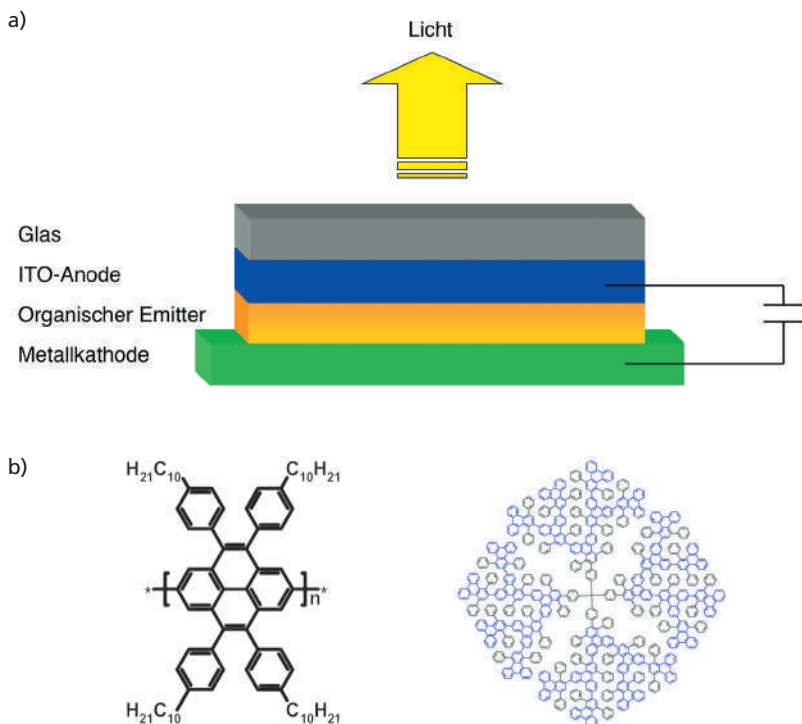


Abbildung 2: Organische lichtemittierende Diode (OLED). A: Schematischer Aufbau, ITO = *indium-tin oxide*. B: Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung synthetisierte neue konjugierte Polymere, die als Festkörper blaues Licht emittieren; links Polyprenylen, rechts ein Polytriphenylendendrimer. Wie viele blau leuchtende Gruppen der Baum trägt, können die Chemiker steuern. Bildnachweis: Schücke/Baumgarten.

(Abb. 2 b links) und Polytriphenylendendrimere (Abb. 2 b rechts). In diesen Molekülstrukturen ist eine intermolekulare Aggregation, die oft zu unerwünschten rot verschobenen Energien im Festkörper führt, durch die geometrische Abschirmung der Moleküle verhindert. Daher treten nur geringfügige Verschiebungen der Fluoreszenzmaxima beim Vergleich der Lösungs- mit den Festkörperspektren auf und man findet sehr gute blaue Farbkoordinaten in der Elektrolumineszenz. Weitere Forschungsaktivitäten beschäftigen sich mit der Anpassung der Kontaktwiderstände an den Elektroden, um eine Absenkung der Einsatzspannung und eine höhere Effizienz zu erzielen.

Organische Feldeffekttransistoren (OFET)

Um einzelne Farbpunkte in einem Bildschirm anzuregen oder für einfache Schaltkreise in RFIDs, benötigt man Transistoren, die durch die Kontrolle des Stroms zwischen Source- und Drain-Elektroden als schnelle Schalter dienen. Für OFETs werden verschiedene Aufbauten der Elektroden und der Halbleiterschichten verwendet, ein Beispiel ist in Abbildung 3 a gezeigt. Ohne Spannung zwischen Gate- und Source-Elektrode fließt kein Strom, denn der Halbleiter wirkt zunächst elektrisch isolierend. Durch Anlegen einer Spannung zwischen Gate- und Source-Elektrode kommt es in der Halbleiterschicht zur Ladungsträgerbildung, so dass zwischen Source- und Drain-Elektrode ein Strom fließen kann. Die benötigte Schaltspannung kann und soll mehrere Größenordnungen kleiner als die Spannung zwischen Source und Drain sein. Für jede Komponente gibt es entsprechende Polymere, so dass ein vollflexibler Aufbau durch Drucktechniken möglich ist.

Die bisherigen Schwächen polymerer OFETs waren die zu geringen Ladungsträgerbeweglichkeiten und kleine An/Aus-Verhältnisse des Stromflusses. Eine Herausforderung besteht somit darin, die Anzahl von Störstellen, die den Ladungstransport behindern, zu reduzieren. Als neues Modell wurde am Max-Planck-Institut für Polymerforschung ein konjugiertes Copolymer aus alternierenden Donoren und Akzeptoren (Abb. 3 b links) mit dem Gedanken untersucht, dass die intermolekularen Donor- und Akzeptorwechselwirkungen zu engen Molekülkontakten führen sollten und damit zu besserer Ordnung der Polymerketten. Durch weitere Optimierung der Synthese zu hochmolekularen Polymeren und durch Verbesserung der Filmbildungsprozesse, die zu höherer Ordnung führten, ist es dann gelungen, eine hohe Ladungsträgerbeweglichkeit zu erzielen, die den kommerziellen Einsatz vielversprechend erscheinen lässt.

Prinzipiell sollten organische Halbleiter sowohl gute Lochleiter (positive Ladungsüberträger) als auch gute Elektronenleiter (negative Ladungsüberträger) sein, oft findet man allerdings nur unipolares Verhalten, was zum Teil auf zu große Spannungsbarrieren zu den Elektroden zurückgeführt wird. Durch Verwendung großer Farbstoffmoleküle mit relativ niedrig liegendem nicht besetzten Molekülorbital (LUMO) und hoch liegendem besetzten Molekülorbital (HOMO) (Abb. 3 b rechts) konnten ambipolare OFETs mit hohen Elektronen- und Lochleiterbeweglichkeiten zugänglich gemacht werden. Ein wesentlicher Aspekt für

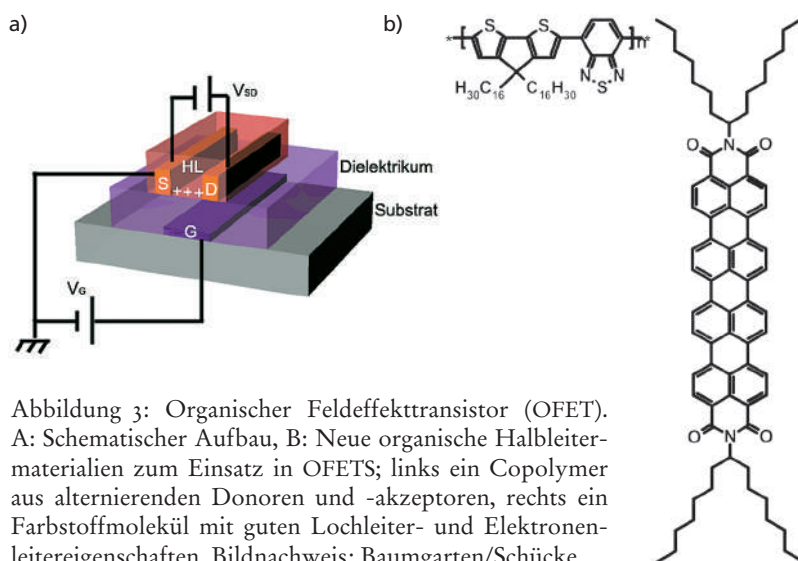


Abbildung 3: Organischer Feldeffekttransistor (OFET). A: Schematischer Aufbau, B: Neue organische Halbleitermaterialien zum Einsatz in OFETS; links ein Copolymer aus alternierenden Donoren und -akzeptoren, rechts ein Farbstoffmolekül mit guten Lochleiter- und Elektronenleitereigenschaften. Bildnachweis: Baumgarten/Schücke.

diesen Erfolg bestand auch in der Passivierung der Zwischenschicht zum Dielektrikum durch Aufbringen einer Monolage von Disilazan auf das Siliziumdioxid. Solche Einkomponenten-Bauteile erlauben es, den Einfluss von supramolekularer Ordnung auf die FET-Ladungstransporteigenschaften zu verstehen, wobei die Halbleitermorphologie gezielt durch Prozessierungsmethoden beeinflusst werden kann und die elektronischen Eigenschaften der Transistoren durch Optimierung der Zwischenschichten verbessert werden.

Organische photovoltaische Zellen (OPV)

Die Photovoltaik ist eine Technologie, die Lichtenergie direkt in elektrische Energie umwandelt. Kommen organische Materialien zum Einsatz, spricht man von organischen photovoltaischen Zellen (OPV). Stark vereinfacht ist der Vorgang (Licht rein – Strom raus) komplementär zu einer LED (Strom rein – Licht raus). Sonnenlicht passiert die transparente Oberseite einer Solarzelle und trifft auf die zwischen den Elektroden befindliche Schicht aus mindestens zwei organischen Halbleitermaterialien (Abb. 4 a). In den Halbleitermaterialien sind positive

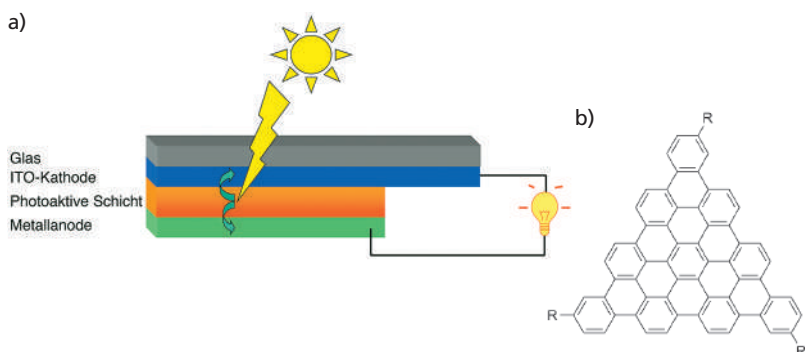


Abbildung 4: Organische photovoltaische Zelle (OPV). A: Schematischer Aufbau. B: Selbstorganisiertes, dreieckiges Molekül, das in der Grenzschicht als Donor mit Perylen als Akzeptor verarbeitet wird. Bildnachweis: Baumgarten/Schücke.

und negative Ladungen vereint. Die Energie des einfallenden Lichtes trennt diese Ladungen an der Grenzfläche der Halbleiterkomponenten auf. Die negativen Ladungen (Elektronen) und die positiven Ladungen (Löcher) wandern getrennt zu den entsprechenden Elektroden und erzeugen dadurch ein Ladungsgefälle, so dass ein Strom fließen kann.

Der erste Ansatz zur lichtinduzierten Ladungstrennung in der organischen Photovoltaik ist der Einsatz von je einer Donor- und einer Akzeptor-Komponente. Diese beiden Komponenten transportieren jeweils nur Elektronen oder nur Löcher zu den entsprechenden Elektroden. Die eigentliche Ladungstrennung geschieht an der Grenzfläche zwischen Donor- und Akzeptor-Komponente. Durch Mischen von Donor und Akzeptor und anschließendes Verfilmen der Mischlösung entsteht ein sich gegenseitig durchdringendes Netzwerk, ein so genannter Heteroübergang. Durch diese im Vergleich zu einer Schichtmorphologie deutlich vergrößerten Grenzflächen zwischen Donor und Akzeptor und einen immer weiter optimierten Zellaufbau sind Wirkungsgrade von bis zu 10 % erzielt worden. Was man letztendlich erreichen möchte, ist eine phasengetrennte Morphologie, in der separate Wanderungswege für positive (auf den Donoren) und negative Ladungen (auf den Akzeptoren) vorliegen. Am häufigsten werden konjugierte Polymere als Donoren und Fulleren-Derivate als Akzeptoren eingesetzt.

Die Verwendung selbstordnender Materialien ist ein vielversprechender Ansatz, um die Ladungsbeweglichkeit zwischen benachbarten Molekülen im Vergleich mit amorphen Materialien zu erhöhen, während die Moleküle noch aus Lösung verarbeitet werden können. Dieser Ansatz wurde in Kooperation mit der Gruppe von Richard Friend im Jahr 2001 unter Verwendung einer Mischung aus Hexabenzocoronen (HBC) als Donor und Perylen als Akzeptor etabliert. In der Fortführung dieses Konzepts wurden neue dreieckig geformte diskotische Moleküle mit unterschiedlich langen schwalbenförmigen Alkylketten synthetisiert (Abb. 4 b). Dieses Moleküldesign ergab eine extrem breite flüssigkristalline Phase für das Derivat mit den langen Ketten mit einem Phasenübergang bei Raumtemperatur. Dieser Phasenübergang spielt eine zentrale Rolle für das Selbstheilungsverfahren, welches die makroskopischen Domängengrenzen verringert. Für Mischungen dieser dreieckig geformten Moleküle mit Perylen als Akzeptor zwischen einer Indium-Zinn-Oxid- (ITO) und einer Aluminium-Elektrode wurden externe Quanteneffizienzen von 19 % bei einer Wellenlänge von 490 nm erzielt. Die wesentlich bessere Effizienz für die phasenbildenden Moleküle wird auf die verbesserte intramolekulare Packung durch Tempern zurückgeführt, was zu einer Verbesserung von Ladungstransport und Anregungsdiffusionslänge führt, beides Schlüsselparameter für die Bauteilleistung. Zukünftige Fortschritte erhofft man sich von weiteren selbstorganisierten Molekülen mit optimierten optischen, strukturellen und elektrischen Eigenschaften.

Die Grätzel-Zelle

Neben den auf Donor-Akzeptor-Mischungen konjugierter Moleküle und Polymere basierenden Zellen wird für die organische Photovoltaik an einem weiteren Zelltyp gearbeitet: elektrochemischen Farbstoffzellen, die nach ihrem Entwickler auch Grätzel-Zellen genannt werden. Dieser Typus erscheint ebenfalls vielversprechend, da die Materialien der Zellen sehr preiswert sind und ihre Herstellung unter relativ einfachen Bedingungen geschehen kann.

Das Funktionsprinzip der Grätzel-Zelle orientiert sich am photoelektrochemischen Prozess, der während der Photosynthese in Pflanzenblättern abläuft. Eine Grätzel-Zelle ist prinzipiell aufgebaut aus einem lichtabsorbierenden Farbstoff, einem Elektronentransportmaterial

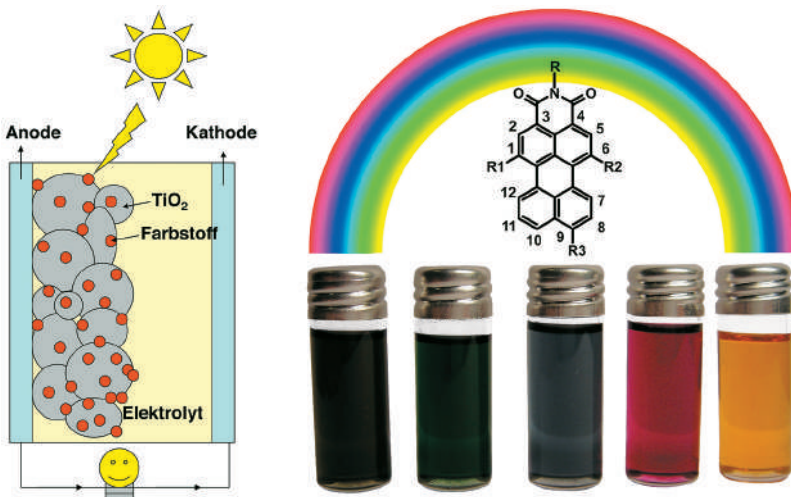


Abbildung 5: Elektrochemische Farbstoffzelle (Grätzel-Zelle). A: Schematischer Aufbau. B: Neue metallfreie lichtabsorbierende Perylen-Farbstoffe, Beispiel für eine Molekülstruktur und Farbpalette. Bildnachweis: Baumgarten/Schücke/Li.

(Titandioxid TiO₂), einem Elektrolyten und zwei Elektroden (Abb. 5 a). Der durch Lichtabsorption angeregte Farbstoff überträgt ein angeregtes Elektron auf das Elektronentransportmaterial, von dort gelangt das Elektron zur Anode. Der Farbstoff wird durch den Elektrolyten regeneriert, der Elektrolyt selbst erhält ein Elektron durch die Kathode zurück und steht für einen weiteren Zyklus zur Verfügung. Der Elektrolyt fungiert somit als Elektronendepot. Es sind Wirkungsgrade von 10–11 % erreicht worden, jedoch unter Einsatz von Ruthenium-Komplexen, eines ökologisch bedenklichen Schwermetallfarbstoffs.

Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung werden neue Farbstoffe für die Anwendung in Grätzel-Zellen entwickelt, synthetisiert und getestet. Ungiftige Perylenderivate haben hervorragende chemische, thermische und photochemische Stabilität und werden daher als metallfreie Farbstoffe vielfach in verschiedenen optischen Bauteilen verwendet. Mit ihrem großen π -konjugierten System bilden Perylen-Monoanhydride (PMAs) eine vielseitige synthetische Plattform für Funktionalisierungen besonders in den 1-, 6- und 9-Positionen mit

unterschiedlichen Substituenten, während das Anhydrid als Akzeptorkomponente oder Ankergruppe funktioniert. So ist es gelungen, basierend auf diesem Perylen 1 eine ganze Familie von Derivaten herzustellen, die einen Regenbogen von Farben zeigen und darüber einstellbare spektroskopische und elektrochemische Eigenschaften besitzen (Abb. 5 b). Der beste von diesen Perylen-Farbstoffen liefert einen Wirkungsgrad von 6,8 % bis 7,2 % unter Standard-Solarbedingungen (AM 1,5).

Vergleich organischer und anorganischer Solarzelltypen

Eine wichtige und zur Zeit noch offene Frage ist, unter welchen Bedingungen polymerbasierte Solarzellen und die Grätzel-Zelle mit den aktuellen siliziumbasierten Solarzellen kommerziell mittelfristig konkurrieren können. Für den Moment hat die klassische Silizium-Solarzellen-Industrie den Vorteil, die bereits bestehende Silizium-Infrastruktur der Computerchipindustrie nutzen zu können. Darüber hinaus wird die Silizium-Technologie schon 60 Jahre weiterentwickelt seit der ersten anorganischen Solarzelle 1954 in den Bell-Laboratories/USA.

Für den Wirkungsgrad einer Solarzelle sind sowohl die optischen Eigenschaften (Absorption) als auch die elektrischen Eigenschaften (Ladungsträgermobilität) entscheidend. Der Wirkungsgrad beschreibt das Verhältnis von nutzbarer elektrischer Leistung zur gesamten einfallenden Lichtenergie auf einer definierten Fläche. Der momentan erreichbare Wirkungsgrad polymerbasierter OPVs liegt bei etwa 10 %. Jedoch wird in den kommenden 10-15 Jahren mit einer Verdopplung der Effizienzen gerechnet, was ihren Einsatz auch wirtschaftlich interessant macht.

Auch wenn die kommerziellen Silizium-Solarzellen Wirkungsgrade von 15-20 % erreichen und eine Nettolaufzeit von etwa 20 Jahren besitzen, sind sie teuer und aufwändig in der Herstellung sowie mechanisch unflexibel und spröde. Daher erhöht sich das Interesse an polymerbasierten Solarzellen, die flexibel, einfach, billig und in großen Flächen zu produzieren und deutlich dünner und leichter sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Flexibilität organischer Funktionsmaterialien, ihre einfache technische Verarbeitbarkeit zu großflächigen Anwendungen und ihre niedrigen Kosten verleihen der Polymerelektronik das Potenzial, die herkömmliche siliziumbasierte Halbleitertechnologie abzulösen oder zumindest zu ergänzen. Die individuellen mikroskopischen Einflüsse von Molekülstruktur, Morphologie und Aufbau eines polymerelektronischen Bauteils – gleich welchen Typs – werden immer besser verstanden, erfordern jedoch noch weitere Forschungsanstrengungen. Eingedenk der 30 Jahre kürzeren Entwicklungszeit der organischen Halbleiter im Vergleich mit der siliziumbasierten Technik sind die bisherigen Ergebnisse sehr ermutigend und lassen preiswerte, großflächige und flexible Lösungen für die Zukunft erwarten.

Literatur

- Feng X., Liu M., Pisula W., Takase M., Li J., Müllen K. (2008) Supramolecular Organization and Photovoltaics of Triangle-shaped Discotic Graphenes with Swallow-tailed Alkyl Substituents. In: *Advanced Materials* 20, S. 2684-2689.
- Friend R. H. (2001) Conjugated polymers. New materials for optoelectronic devices. In: *Pure and Applied Chemistry*, Bd. 73(3), S. 425-430.
- Kawano S., Yang C., Ribas M., Balushev S., Baumgarten M., Müllen K. (2008) Blue Emitting Poly(2,7-pyrenylene)s: Synthesis and Optical Properties. In: *Macromolecules* 41, S. 7933-7937.
- Li C., Yum J., Moon S., Herrmann A., Eickemeyer F., Pschirer N. G., Erk P., Schöneboom J. C., Müllen K., Grätzel M., Nazeeruddin M. K. (2008) An Improved Perylene Sensitizer for Solar Cell Applications. In: *ChemSusChem* 1, S. 615-618.
- Qin T., Zhou G., Scheiber H., Bauer R. E., Baumgarten M., Anson C. E., List E. J. W., Müllen K. (2008) Polytriphenylene Dendrimers: A Unique Design for Blue Light Emitting Materials. In: *Angewandte Chemie International Edition* 47, S. 8292-8296.
- Tsao H. N., Pisula W., Liu Z., Osikowicz W., Salaneck W. R., Müllen K. (2008) Unipolar Behavior in Discotic Dye Field-Effect Transistors. In: *Advanced Materials* 20, S. 2715-2719.
- Tsao H. N., Cho D., Andreasen J. W., Rouhanipour A., Breiby D. W., Pisula W., Müllen K. (2009) The Influence of Morphology on High Performance Polymer Field-effect Transistors. In: *Advanced Materials* 21, S. 209-212.

Oxidation – Verderb oder Schutz¹

Man denke an die blau-grüne Kupferkuppel des Berliner Doms, an verwittertes feuerrotes Gestein in den Wüsten Nevadas und Arizonas oder an einen angeschnittenen Apfel, der sich nach wenigen Minuten braun färbt: drei ganz unterschiedliche Objekte, die jedoch alle etwas gemeinsam haben. Ihr äußeres Erscheinungsbild, insbesondere die Farbe, verdanken sie der Tatsache, dass ihre Oberflächen oxidiert sind. Denn bei den meisten Materialien bildet sich in Kontakt mit Luft spontan eine mehr oder weniger dicke oberflächliche Oxidschicht. Besonders interessant und auffällig werden die Effekte der Oxidation bei Metallen, denn diese können rosten und dadurch zum Versagen von ganzen Bauwerken, Autos, Werkzeugen oder Haushaltsgeräten führen. Die Rostbildung, auch Korrosion genannt, ist ein unerwünschter Effekt, der z.B. verantwortlich war für das Einstürzen der über 100 Jahre alten Kinzua-Brücke im US-Staat Pennsylvania. Für ihren Erhalt als Baudenkmal setzt sich heute das *Pennsylvania Department of Conservation and Natural Resources* ein (www.kinzuabridgefoundation.com). Auch bei medizinischen Implantaten, die im menschlichen Körper eingebaut werden, wäre Korrosion verheerend. Doch Oxidation kann sich bei verschiedenen Metallen ganz unterschiedlich auswirken und in gewissen Fällen sogar erwünscht sein, und zwar nicht nur aus ästhetischen Gründen wie bei den grünen Kupferkuppeln. Denn sie kann vielfältig ablaufen und führt nicht gezwungenermaßen zur Korrosion des Metalls.

Doch warum können sich Metalle so gegensätzlich verhalten? Und wie wird aus »normalem« Stahl ein rostfreier Stahl?

Metalle und ihre Eigenheiten

Stahl oxidiert bekannterweise unter Einfluss von Sauerstoff und Wasser aus der Umgebung. Dadurch kann Rost entstehen, ein poröses Eisen-

¹ Vortrag beim XLAB Science Festival 2012.

oxyhydroxid, das leicht abbröckelt und das darunter liegende Metall weiterem Sauerstoff ausliefert, der sich in das Material »hineinfrisst« und es zersetzt. Ganz im Gegensatz dazu stehen Edelmetalle wie Gold, Platin und Silber, an deren Oberflächen der Luftsauerstoff abprallt oder sich allerhöchstens in einer atomar-dünnen Schicht absetzt, ohne ins Innere des Materials zu gelangen. Diese besondere Eigenschaft macht sie auch zu Recht zu den edelsten und teuersten Metallen. Die beiden Extremfälle von Stahl und Edelmetall sind jedoch nicht die einzige Möglichkeit: Nicht zu vernachlässigen sind rostfreie Stähle, die zwar oxidieren, aber nicht korrodieren und aus diesem und weiteren Gründen in Industrie, Haushalt oder in der Medizintechnik unverzichtbar geworden sind.

Die Ursachen des unterschiedlichen Oxidationsverhaltens der Materialien sind auf der atomaren Größenskala zu suchen. Die Oxidation beginnt in dem Moment, wo sich erste Sauerstoffmoleküle (O_2 , bestehend aus zwei Sauerstoffatomen) den Atomen der Oberflächenschichten des Materials nähern und mit ihnen reagieren. Kaum tritt ein Metall in Kontakt mit Luft oder Wasser, was schwer zu vermeiden ist, bildet sich innerhalb weniger Picosekunden (10^{-12} Sekunden) eine nanometerdünne Oxidschicht auf der Metalloberfläche. Die Oxidation, vom griechischen *oxys* = sauer, läuft nämlich spontan in Anwesenheit von Sauerstoff ab. Und Luft besteht zu 21 % aus dem Gas O_2 .

Erwünschte Eigenschaften von Implantatmaterialien

Das Augenmerk sei hier auf eine Kategorie von Metallen gerichtet, die eine äußere wichtige Funktion erfüllen und grundlegend verstanden sein sollten, bevor sie zum Einsatz kommen: jene Materialien, die als Träger oder Beschichtung in medizinischen Implantaten dienen und eine hohe Verträglichkeit und Lebensdauer aufweisen müssen. Oft werden Implantate aus Legierungen hergestellt, das heißt aus Materialien, die aus dem Zusammenfügen von unterschiedlichen reinen Metallen zu einem Mischkristall entstehen, mit dem Ziel, die Werkstoffeigenschaften zu verbessern. Ein sehr gutes Beispiel so genannter Biomaterialien sind die Kobalt-Chrom-Legierung (CoCr) und Titannitrid (TiN). Während CoCr eine der wichtigsten und am häufigsten eingesetzten Legierungen in der Orthopädie und Gefäßchirurgie ist, z.B. für Hüftprothesen, Zahnimplantate, Herzklappen und Stents, wird TiN als Be-

schichtungsmaterial von Implantaten oder in Herzschrittmacherelektroden genutzt. Die Anforderungen an Biomaterialien sind hoch: Sie sollen fest, widerstandsfähig, verschleißfest, korrosionsbeständig, ungiftig und möglichst auch noch erschwinglich sein. Oxidation findet jedoch auch bei diesen Materialien statt, und ausgerechnet die Oxidschicht auf der Metalloberfläche agiert als einziger Vermittler zwischen dem Metall und dem menschlichen Körper. Die Verträglichkeit eines Implantats wird bestimmt von den chemischen Reaktionen an der Grenzfläche zwischen Material und Körper und von der mechanischen Beanspruchung der Implantatoberfläche, die z.B. zur Freisetzung von Verschleißpartikeln im Körper führen kann. Um allergische Reaktionen, Entzündungen oder gravierende Erkrankungen zu vermeiden, ist es einerseits sehr wichtig zu wissen, woraus die dünnen Oxidschichten überhaupt bestehen. Andererseits ist es eine interessante Frage, wie sie sich in so kurzer Zeit bilden.

Materialien am Computer simulieren

Die Oxidationsreaktionen auf der Nanometer-Skala konnten Schritt für Schritt und für unterschiedliche Materialien in der Arbeitsgruppe *Hybrid Materials Interfaces* (HMI) der Universität Bremen am Computer simuliert und analysiert werden. Mit Hilfe einzig und allein eines Hochleistungsrechners und den grundlegenden Gesetzen der Quantenmechanik war es möglich, die chemischen Wechselwirkungen der Atome untereinander mit so hoher Präzision zu beschreiben wie mit keiner anderen Technik. Das ist der Schlüssel zum Verständnis der Oxidationsphänomene. Man kann so mit verblüffender Genauigkeit die physikalischen Eigenschaften von Festkörpern oder Molekülen berechnen und die chemischen Reaktionen simulieren, die an ihrer Oberfläche stattfinden. Simulationen der Oxidationsreaktionen können als Film auf dem Rechnerbildschirm wiedergegeben werden. Diese Simulationen liefern Erkenntnisse, die mit keiner anderen Technik erforscht werden können. Mit diesem Werkzeug wurden die Legierungen CoCr und TiN untersucht (Abb. 1), zwei metallische Verbindungen, die in der Kristallstruktur deutliche Unterschiede aufweisen: Die erste kristallisiert ohne eine vorgegebene Anordnung der Elemente Kobalt (Co) und Chrom (Cr) in einem hexagonal-symmetrischen Gitter, in dem zweiten ordnen sich die Titanatome (Ti) und die Stickstoffatome (N) in dem

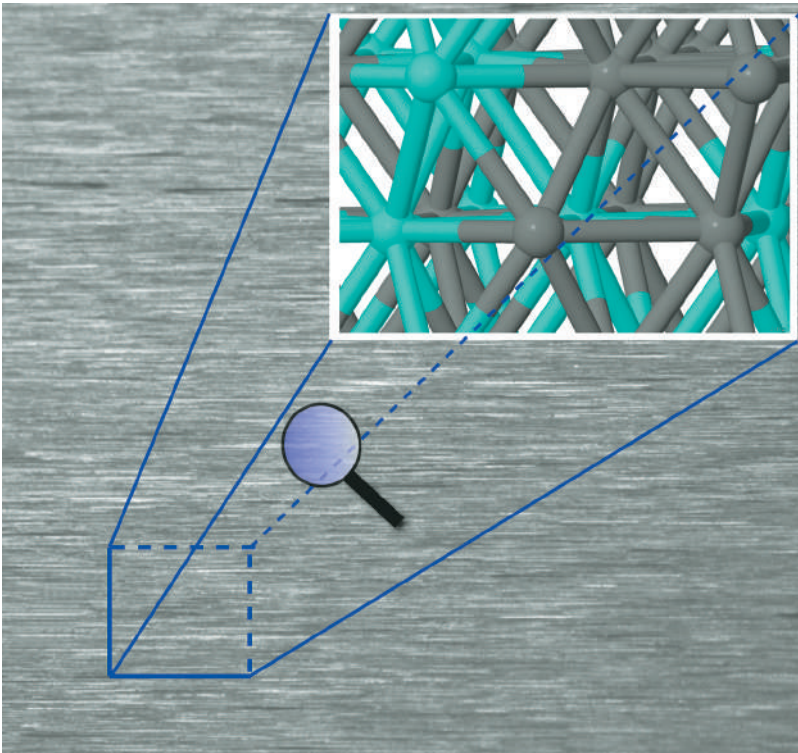


Abbildung 1: Ein Zoom in ein Metall hinein bis auf die Nanometerskala (10^{-9} m) zeigt die einzelnen Atome, aus denen das Metall besteht. In dem am Computer erstellten Bild sind Atome als Kugeln und atomare Bindungen als Stäbe dargestellt.

bekannten kubischen Kochsalzgitter an (Abb. 2). Das kleine Sauerstoff-Molekül O_2 ist für diese Metalloberflächen sehr verhängnisvoll, da es nichts anderes anstrebt, als sich der Oberfläche zu nähern und den Metallatomen ihre Elektronen zu entreißen. Und das gelingt ihm auch, denn Sauerstoff hat die natürliche Tendenz, die leicht verfügbaren Elektronen der Metalle einzufangen: Die Elektronen fließen spontan vom Metall zum Sauerstoff. Als Folge des Elektronenüberflusses passiert jedoch etwas Besonderes im O_2 -Molekül: Die Bindung zwischen den beiden Sauerstoffatomen bricht, das Molekül spaltet. Die getrennten Sauerstoffatome binden dabei fest an die Metallatome der Oberfläche. Der beschriebene Prozess stellt nichts anderes als die spontane Oxida-

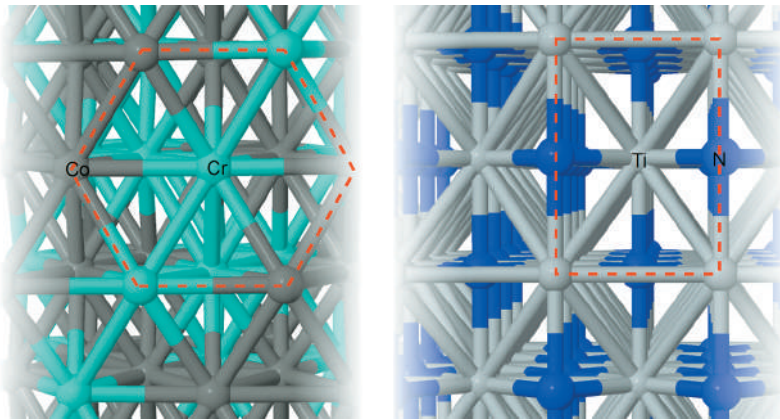


Abbildung 2: Atomare Gitterstruktur einer Kobalt-Chrom-Legierung (links) und von Titannitrid (rechts). Während CoCr in hexagonaler Symmetrie mit zufälliger Anordnung der Kobalt- (Co) und Chromatome (Cr) kristallisiert, ist TiN durch die kubische Kochsalzstruktur charakterisiert, bei der Titan- (Ti) und Stickstoffatome (N) sich regelmäßig im Gitter anordnen.

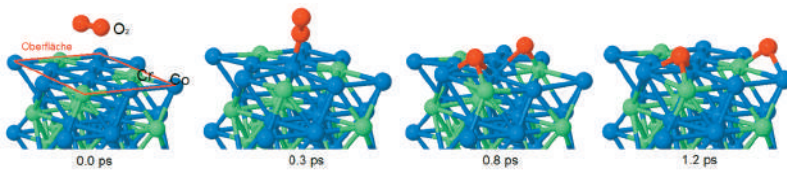


Abbildung 3: Die Anfangsphase der Oxidation: zeitlicher Ablauf des Aufpralls eines Sauerstoffmoleküls (O_2) auf einer Kobalt-Chrom-Oberfläche, im seitlichen Schnitt betrachtet. Die Zeit (in Picosekunden, ps) ist angegeben.

tionsreaktion dar (Abb. 3). Doch dabei bleibt es nicht, denn in der Luft gibt es unendlich viele solcher O_2 -Moleküle, die sich auf die Oberfläche drängen und Elektronen haben möchten. Deshalb zwingen sie die Metallatome, aus der Oberfläche auszutreten, um so in das Innere des Materials zu gelangen, wo sich noch viele weitere elektronenreiche Atome verstecken. Der beschriebene Ablauf ist für viele Metalle ähnlich, aber nicht identisch. Das Fortschreiten des Sauerstoffangriffs kann sogar sehr unterschiedlich verlaufen.

Oxidation der Kobalt-Chrom-Legierung

Bei der CoCr-Legierung konnte ein entscheidender Effekt in der Anfangsphase der Oxidation beobachtet werden (Zimmermann & Colombi Ciacchi 2010): Das kleine O_2 -Molekül aus der Luft steuert gezielt auf die Chromatome der CoCr-Oberfläche zu und nimmt sich ihrer Elektronen an, während die Kobaltatome nur zuseher bleiben. Der Unterschied zwischen Kobalt und Chrom ergibt sich dabei aus der speziellen und einzigartigen Verteilung ihrer Elektronen. Dank dieses Austausches von Elektronen unter den Atomen geschehen bemerkenswerte Ereignisse. Einerseits bricht, wie beschrieben, die Bindung im O_2 -Molekül, so dass die zwei Sauerstoffatome frei werden und neue Bindungen mit Metallatomen eingehen können. Das passiert natürlich nicht nur mit einem, sondern mit einer Vielzahl von O_2 -Molekülen aus der Luft. Andererseits werden die Chromatome von dem Sauerstoff aus der Oberfläche herausgezogen, um darüber ein Chromoxid, also ein Netzwerk aus Cr- und O-Atomen, zu bilden (Abb. 4). Die von Chrom hinterlassenen Leerstellen im Material werden wiederum von einzelnen Sauerstoffatomen genutzt, um ins Innere der CoCr-Legierung zu gelangen. Während ein ähnlicher Prozess bei Eisenlegierungen, wie z.B. Stahl, ungehindert weiterlaufen kann, hat CoCr jedoch eine Besonderheit: Das frisch gebildete Chromoxid bröckelt nicht ab, sondern verhindert die weitere Infiltration von Sauerstoffatomen und dient somit als Schutzschicht für die darunter liegende Legierung, die nicht weiter oxidieren kann. Man bezeichnet das Phänomen als Passivierung der Oberfläche. Diese Eigenschaft von Chrom wird auch bei rostfreien Stählen erfolgreich zum Korrosionsschutz genutzt. Rostfreie Stähle sind nämlich Eisen-Chrom-Legierungen, in denen dem Eisen 10-20 % Chrom sowie kleinere Anteile weiterer Elemente beigemischt werden. Derartige Legierungen lassen sich ebenso wie CoCr am Computer simulieren.

Oxidation von Titanitrid

Bei TiN läuft es anders ab, was nicht nur an der unterschiedlichen Gitterstruktur liegt, sondern auch an der Tatsache, dass Titan ein Metall ist, Stickstoff hingegen nicht. Auftreffende O_2 -Moleküle steuern den Elektronen der Titanatome entgegen und ziehen dabei die Titanatome aus

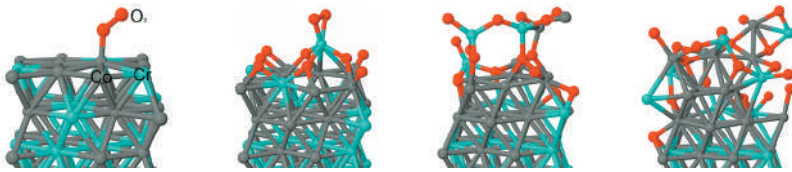


Abbildung 4: Schnappschüsse der Oxidbildung auf der Oberfläche einer Kobalt-Chrom-Legierung (CoCr) nach fortlaufender Zugabe von O_2 -Molekülen (von links nach rechts). Nachdem Sauerstoff sich der Oberfläche nähert, bildet sich innerhalb weniger Picosekunden eine nanometerdünne Oxidschicht, also ein Netzwerk aus Co-, Cr- und O-Atomen (rechts).

der Oberfläche heraus (Zimmermann *et al.* 2009). Es bildet sich ein Oxid, also ein Netzwerk aus Ti- und O-Atomen über der ursprünglichen Oberfläche, während die Stickstoffatome völlig unberührt an ihren Gitterplätzen bleiben (Abb. 5). Denn Stickstoff und Sauerstoff haben eine sehr geringe Tendenz, miteinander zu reagieren. Die von Titan hinterlassenen Leerstellen werden jedoch nicht, anders als bei CoCr, von Sauerstoff genutzt, um ins Innere des Materials zu gelangen. Vielmehr bilden die Stickstoffatome in den Leerstellen miteinander kleine N_2 -Gasmoleküle, die später in die Atmosphäre entfliehen. Dies ist kaum verwunderlich, da Stickstoff ein wenig reaktives Element ist und in purer Form nur als zweiatomiges Molekül N_2 auftritt, aus dem die Luft, die wir einatmen, übrigens zu 78 % besteht. Wie bei CoCr schützt das stabile Titanoxid das darunter liegende Material vor weiterer Oxidation. Auch TiN passiviert also in Anwesenheit von Sauerstoff und ist korrosionsbeständig.

Eine Frage der Elektronen

Diese beiden Beispiele verdeutlichen, dass der treibende Faktor bei der Oxidation der Austausch von Elektronen unter den Atomen ist – ein denkbar kleiner Mechanismus mit riesigem Effekt, wenn z.B. ganze Brücken oder Schiffe verrosten und unbrauchbar werden. Der Elektronenaustausch führt zum Aufbrechen und zur Neubildung von atomaren Bindungen und bestimmt somit den Ablauf des Oxidationsprozesses in einem Material. Denn jedes Element, sei es Chrom, Titan,

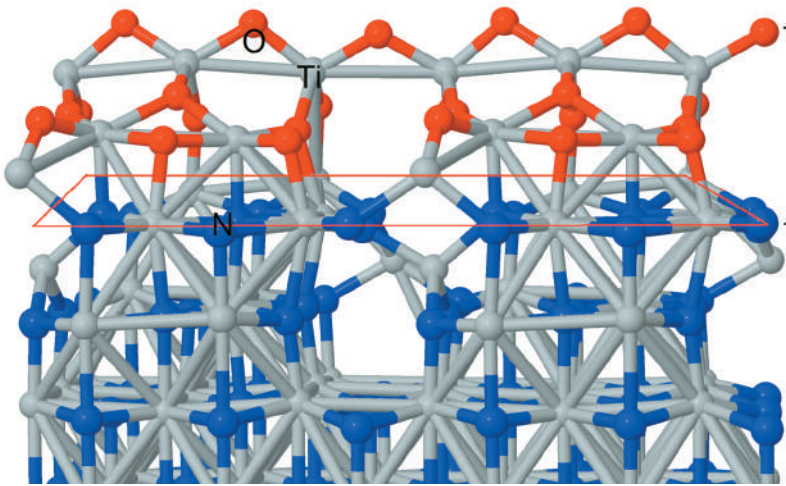


Abbildung 5: Atomare Struktur einer oxidierten Titannitrid-Oberfläche, im seitlichen Schnitt betrachtet. Das gebildete Oxid ist ein Netzwerk aus Titan- (Ti) und Sauerstoffatomen (O), während die Stickstoffatome (N) am Oxidationsprozess nicht teilnehmen und an ihren Gitterplätzen bleiben. Das ursprüngliche Oberflächenniveau vor Beginn der Oxidation ist bezeichnet.

Eisen oder Gold, ist charakteristisch in der Anzahl und Verteilung seiner Elektronen und reagiert daher in unterschiedlicher Weise mit Sauerstoff.

So kann es passieren, dass je nach Material in Kontakt mit Luft die Oxidation unterschiedlich weit voranschreitet: Bei den Edelmetallen findet kaum Elektronenaustausch zwischen O_2 und dem Metall statt, so dass sich keine Oxidschicht bildet. Bei den chromhaltigen rostfreien Stählen hält die Oxidation nach einer Weile an, dank der neu gebildeten, schützenden Chromoxidschicht. Die Oberfläche ist dann passiviert und korrosionsbeständig. Aufgrund dieser Eigenschaft sind auch Biomaterialien optimal für das chemisch aggressive Milieu des menschlichen Körpers gewaffnet. Ebenso, im Falle von Kupfer, schützt die in Luft spontan gebildete grüne Patina aus Kupfercarbonat das darunter liegende Kupfer vor Korrosion. Bei Eisen oder Stählen mit niedrigem Chromanteil verläuft die Oxidation ungehindert weiter und führt zu dem ungeliebten Phänomen der Rostbildung.

Ausblick

Man kann sich nun derselben Simulationstechnik bedienen, um gezielt Werkstoffeigenschaften am Computer zu testen und zu verbessern, noch bevor die Materialien zum Einsatz kommen. Dieses zeichnet eindrucksvoll den Übergang von zeit- und ressourcenintensiven Methoden, die auf Versuch und Irrtum basieren, zu einer wissensbasierten Entwicklung, die sich die Vorhersage als primäres Ziel setzt.

Literatur

- J. Zimmermann, M.W. Finnis, L. Colombi Ciacchi (2009) Vacancy segregation in the initial oxidation stages of the TiN(100) surface, *Journal of Chemical Physics* 130, S. 134.714.
- J. Zimmermann, L. Colombi Ciacchi (2010) Origin of the selective Cr oxidation in CoCr alloy surfaces, *Journal of Physical Chemistry Letters* 1, S. 2343-2348.

Marina V. Rodnina und Wolfgang Wintermeyer

Genauigkeit und Geschwindigkeit der Proteinsynthese¹

Die schnelle und genaue Auswahl des korrekten Substrats ist für Enzyme mit einem einzigen Substrat in der Regel kein Problem, da hinreichend viele spezifische Wechselwirkungen zwischen Enzym und Substrat ausgebildet werden können. Dagegen müssen Polymerasen in jeder Runde der Elongation aus verschiedenen, chemisch und strukturell ähnlichen Substraten das jeweils richtige auswählen. Obwohl dabei eine einzige Wasserstoffbrücke mehr oder weniger über korrekt und nicht-korrekt entscheiden kann, müssen Genauigkeiten von 10^4 bis 10^8 oder höher erreicht werden. Die Lösung ist ein komplexer Bindungsmechanismus mit *induced-fit*-Komponenten und – etwa bei DNA-Polymerasen – die Einführung von Korrekturschritten. Das gilt auch für Ribosomen, die Protein-Polymerasen der Zelle. Ribosomen wählen ihre Substrate, die in Form von aktivierten Aminosäuren als Aminoacyl-tRNAs (Aa-tRNAs) vorliegen, entsprechend der Komplementarität der Anticodon-Sequenz zum Codon-Triplett auf der mRNA aus.

Aa-tRNAs binden an das Ribosom in Form sehr stabiler Komplexe mit einem Elongationsfaktor (EF-Tu in Bakterien) und GTP (sog. Ternärkomplex). In Abhängigkeit von der Passung des Anticodons der tRNA im Ternärkomplex an das Codon, das gerade übersetzt werden muss, erfolgen die weiteren Schritte. Bei Erkennung eines vollständig komplementären Codons, also der Ausbildung von drei Basenpaaren zwischen Anticodon und Codon, wird die Hydrolyse von GTP durch EF-Tu aktiviert. Diese führt dazu, dass die Aa-tRNA aus dem Komplex mit EF-Tu freigesetzt wird und in das aktive Zentrum des Ribosoms binden kann, wo es zur Peptidverknüpfung kommt (Abb. 1). Dieser – auf den ersten Blick recht aufwändig wirkende – Mechanismus der

1 Marina V. Rodnina, Wolfgang Wintermeyer: Genauigkeit und Geschwindigkeit der Proteinsynthese. Biospektrum 4/2011, S. 389-392. Copyright Springer-Verlag GmbH. Reproduced with permission.

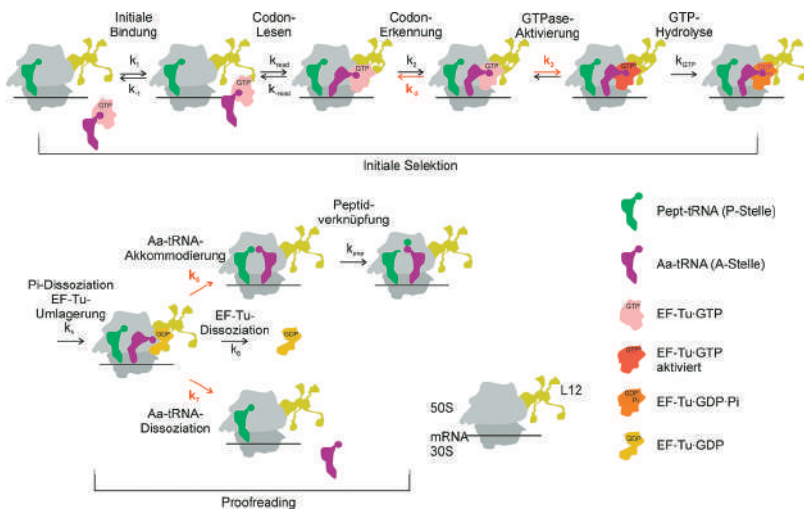


Abbildung 1: Kinetischer Mechanismus der Bindung von Aa-tRNA und Peptidverknüpfung. Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k_1 bis k_7 und k_{-1} bis k_{-7} wurden durch schnelle kinetische Messungen (*stopped-flow* bzw. *quench-flow*) unter *pseudo-first-order*-Bedingungen bestimmt. Die chemischen Schritte (GTP-Hydrolyse, Peptidverknüpfung) sind intrinsisch schnell, jedoch kinetisch von der jeweils vorhergehenden Umlagerung (GTPase-Aktivierung k_4 , bzw. Akkommodierung k_6) bestimmt. Die für die Substratselektion in der initialen Selektion (k_{-2} , k_3) und im *proofreading* (k_5 , k_7) wichtigen Schritte sind rot markiert. Die 30S- und 50S-Untereinheiten des Ribosoms sind dunkel- bzw. hellgrau dargestellt.

Substratbindung ermöglicht dem Ribosom die hinreichend genaue Unterscheidung zwischen korrekten (*cognate*), inkorrekten (*non-cognate*) und fast-korrekten (*near-cognate*, zwei statt drei Basenpaare zwischen Anticodon und Codon) Ternärkomplexen bei gleichzeitig hoher Geschwindigkeit. Die beobachteten Fehlerhäufigkeiten des Aminosäureinbaus in der Proteinsynthese liegen bei 1 : 1.000 bis 1 : 10.000, je nach Codon und Codon-Kontext, die Geschwindigkeit bei 10–20 s^{-1} pro Ribosom. Die Beschreibung der Mechanismen, mit denen dies erreicht wird, ist Gegenstand dieses Aufsatzes.

Kinetische Selektion: die Rolle der Vorwärtsreaktionen

Die Genauigkeit der Aa-tRNA-Selektion am Ribosom wird in zwei Phasen kontrolliert (Abb. 1):^[1] während der Bindung bzw. Dissoziation der Ternärkomplexe vor der GTP-Hydrolyse (initiale Selektion) und bei der Akkommodierung bzw. Dissoziation nach der GTP-Hydrolyse (*proofreading*). Eine weitere Korrekturmöglichkeit, die allerdings erst nach einem Fehleinbau greift und zum Verlust des bereits synthetisierten Peptids führt, ist die Hydrolyse inkorrekt gebildeter Peptidyl-tRNAs am Ribosom durch Terminationsfaktoren.^[2] Die beobachtete Häufigkeit des Einbaus falscher Aminosäuren hängt zum einen von der Effizienz dieser Selektions- bzw. Korrekturmechanismen, zum andern von der Häufigkeit der jeweils korrekten Aa-tRNAs relativ zu den fast-korrekten Konkurrenten ab.

Die kinetische Analyse hat vier Elementarreaktionen identifiziert, deren Geschwindigkeitskonstanten für korrekte und fast-korrekte Ternärkomplexe bzw. Aa-tRNAs verschieden sind, während die anderen Teilschritte sich kaum unterscheiden (Abb. 2, Lit. [3,4]). Die ersten Schritte, initiale Bindung und Codon-Erkennung, sind unabhängig vom Codon, da die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten für korrekte und fast-korrekte Paarung gleich sind (k_1 , k_{-1} , k_2). Dagegen gibt es große Unterschiede in k_{-2} , d.h. der fast-korrekte Ternärkomplex dissoziiert einige 100-mal schneller als der korrekte. Die folgenden Schritte der GTPase-Aktivierung (k_3) und GTP-Hydrolyse sind im Komplex mit korrekter Anticodon-Codon-Paarung mehr als 500-mal schneller als mit fast-korrechter, und die Akkommodierung (k_5) der korrekten Aa-tRNA ist deutlich schneller als die der fast-korrekten, die dafür wesentlich schneller dissoziiert (k_7). Andererseits ist die GTP-Hydrolyse vergleichbar schnell für verschiedene korrekte Anticodon-Codon-Paarungen;^[5] ähnliches gilt für die Peptidverknüpfung.^[6] Diese gleichförmige Reaktivität wird erreicht durch den Ausgleich der unterschiedlich starken Einflüsse des jeweiligen Aa-Restes durch evolutive Anpassung der tRNAs in Sequenz und Struktur.^[5] Dies scheint auch für die (viel langsamere) GTP-Hydrolyse bzw. Dissoziation bei fast-korrechter Paarung zu gelten.^[4]

Der Hauptdiskriminierungsfaktor ist demnach die kinetische Partitionierung zwischen GTPase-Aktivierung (k_3) und Dissoziation des Ternärkomplexes (k_{-2}) bzw. zwischen Akkommodierung (k_5) und Dissoziation (k_7) der Aa-tRNA. Der etwa 1.000-fache Unterschied der

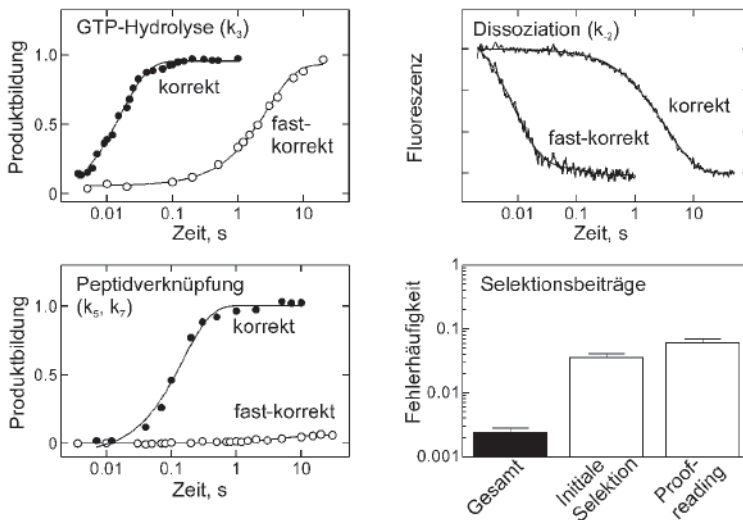


Abbildung 2: Beiträge zur Substratselektion. Kinetische Messungen mit EF-Tu·GTP·Phe-tRNA und Ribosomen mit den Codons UUU (korrekt) oder CUC (fast-korrekt) in der A-Stelle (HiFi-Puffer bei 20 °C, Lit. [4]). GTP-Hydrolyse und Peptidbildung wurden mit radioaktiv markierten Substraten gemessen, die Dissoziation mit fluoreszenzmarkierter tRNA. Der Gesamtfehler ist das Produkt der Fehlerhäufigkeiten aus initialer Selektion und *proofreading*. Die aus den kinetischen Messungen berechneten Fehlerhäufigkeiten (Lit. [4]) stimmen mit den direkt gemessenen gut überein.

Werte für k_{-2} zeigt, dass der Unterschied der thermodynamischen Stabilitäten der korrekten und fast-korrekten Codon-Erkennungskomplexe, $\Delta\Delta G^\circ$ prinzipiell in etwa ausreichend wäre, die beobachteten Genauigkeiten zu erklären. Es ist jedoch wichtig, sich klarzumachen, dass dieses $\Delta\Delta G^\circ$ nicht unmittelbar für die Selektion wirksam wird, weil das System das Gleichgewicht nicht erreicht und auch nicht erreichen soll, da das viel zu langsam wäre. Der Grund ist, dass im Fall des korrekten Codon-Erkennungskomplexes die Folgereaktionen GTPase-Aktivierung und GTP-Hydrolyse so schnell erfolgen, dass der Bindungsschritt nicht equilibrieren kann ($k_3 \gg k_{-2}$). Die kinetische Partitionierung führt demnach dazu, dass der korrekte Komplex mit sehr hoher Präferenz (1.000-fach) in die GTP-Hydrolyse geht, während der fast-korrekte Komplex ($k_3 < k_{-2}$) vorzugsweise (200-fach) dissoziiert.

Als Konsequenz aus der raschen GTP-Hydrolyse und der Nicht-Erreichung des Gleichgewichts ist die Michaelis-Konstante (K_M) für die Bildung des korrekten Codon-Erkennungskomplexes viel größer (Größenordnung micromolar, μM) als die im Gleichgewicht gemessene Bindungskonstante (Größenordnung $0,01 \mu\text{M}$). Die – auf den ersten Blick vielleicht kontra-intuitive – Folge ist, dass die K_M -Werte für korrekte und fast-korrekte Codon-Erkennungskomplexe kaum verschieden sind, obwohl die Affinitäten sich um einen Faktor 400 unterscheiden, sodass die Selektion zwischen korrektem und fast-korrektem Substrat nicht, wie sonst bei den meisten Enzymen, auf den Unterschieden in den Werten für k_{cat}/K_M beruht, sondern dass praktisch nur die Unterschiede in den k_{cat} -Werten zum Tragen kommen.

Strukturelle Basis der Selektion

Die initiale Bindung des Ternärkomplexes an das Ribosom ist unabhängig vom Codon und vor allem vermittelt durch Kontakte zwischen EF-Tu und dem ribosomalen Protein L7/12, von dem das *Escherichia coli*-Ribosom vier Kopien aufweist. Das anschließende Codon-Lesen wird ermöglicht durch strukturelle Fluktuationen der tRNA, insbesondere eine Verbiegung des Anticodon-Stamms, wodurch das Anticodon das Codon im Decodierzentrum der 30S-Untereinheit erreichen kann, während der Rest des tRNA-Moleküls an EF-Tu auf der 50S-Untereinheit gebunden bleibt (Abb. 3).^[7] Die Ausbildung eines korrekten, vollständig gepaarten Anticodon-Codon-Komplexes führt zu einer Umlagerung im Decodierzentrum, bei der A-1492, A-1493 und G-530 der 16S-rRNA ihre Position verändern und Wechselwirkungen mit dem Anticodon-Codon-Duplex ausbilden.^[8] In der ersten und zweiten Codon-Position erkennt das Ribosom korrekte Basenpaare aufgrund ihrer Watson-Crick-Geometrie, unabhängig von der Sequenz, während in der dritten Position auch *wobble*-Basenpaare »erlaubt« sind. Die Umlagerung im Decodierzentrum wird begleitet von einer globalen Umlagerung der Kopfdomäne der 30S-Untereinheit und weiteren Umlagerungen des Ribosoms, die letztendlich zur Stimulierung der GTPase-Aktivität von EF-Tu und zur GTP-Hydrolyse führen. Das Ribosom wirkt demnach wie Verstärker, der ein relativ schwaches Eingangssignal, die freie Energie der Anticodon-Paarung, in ein wesentlich größeres Signal (GTP-Hydrolyse) umwandelt. Dieses wirkt auf die

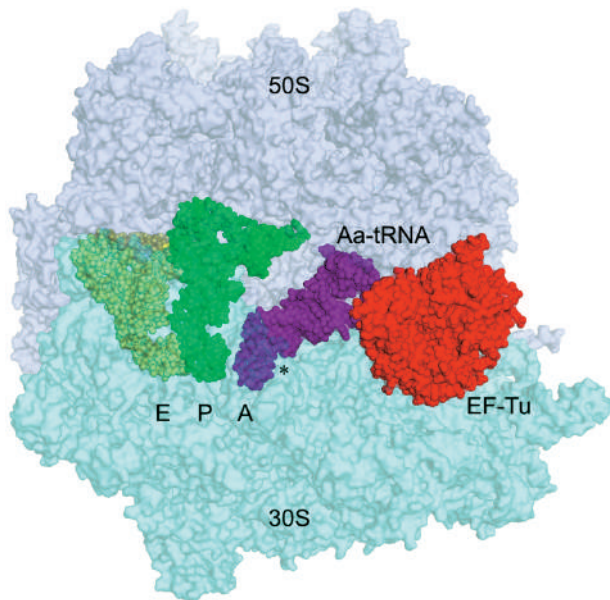


Abbildung 3: Anordnung des Ternärkomplexes am Ribosom nach Codon-Erkennung und GTPase-Aktivierung. Kristallstruktur (Lit. [7]; PDB 2XQD, 2XQE) des Komplexes mit Ribosomen aus *Thermus thermophilus*, P-Stellen-tRNA grün, E-Stellen-tRNA gelb. Die Verbiegung des Anticodon-Arms der Aa-tRNA ist markiert (*).

Konformation von EF-Tu, die den Zugang des Substrats zum aktiven Zentrum kontrolliert.

Das Decodierzentrum auf der kleinen Untereinheit des Ribosoms ist fast 80 Å entfernt von der GTP-Bindungs tasche von EF-Tu auf der großen Untereinheit, wo die GTP-Hydrolyse stattfindet. Eine wichtige Frage ist demnach, wie die Erkennung eines korrekten Codons sowohl die GTPase-Aktivierung als auch die Akkommodierung beschleunigen kann. GTP wird hydrolysiert durch den Angriff eines Wassermoleküls auf das γ -Phosphat. Den Übergangszustand am Ribosom stabilisiert His-84, das im ungebundenen EF-Tu weg vom hydrolytischen Wasser orientiert und am Zugang zum aktiven Zentrum gehindert ist. Bei der GTPase-Aktivierung bewegt sich His-84 zum γ -Phosphat hin. Diese Bewegung muss durch Codon-Erkennung ausge-

löst werden. Offenbar spielt dabei die schon erwähnte Verzerrung der Aa-tRNA eine wichtige Rolle, da die GTPase-Aktivierung nicht zustande kommt, wenn das tRNA-Molekül nicht intakt ist, und beeinträchtigt wird durch Mutationen, welche die Struktur der tRNA an der Stelle der Verzerrung beeinflussen.^[9] Die Kristallstruktur zeigt, dass die relative Orientierung von Aa-tRNA und EF-Tu durch die Verzerrung der tRNA beeinflusst wird.^[7] Dies führt zu einer Stabilisierung der katalytisch wirksamen Orientierung von His-84 durch eine Wechselwirkung mit der Sarcin-Ricin-Schleife der 23S-rRNA, die ursächlich für die GTPase-Aktivierung ist.

Die Uniformität der Erkennung von Fehlpaarungen im Anticodon-Codon-Duplex deutet auf einen globalen Mechanismus hin, bei dem alle Konformationsveränderungen, die durch die Erkennung eines korrekten Codons induziert werden (Umlagerung der 30S-Kopfdomäne, Verzerrung der tRNA und Umlagerungen in EF-Tu), essentiell für die genaue Positionierung des aktiven Zentrums von EF-Tu an der Sarcin-Ricin-Schleife sind. In den Fällen, wo ein fast-korrektes Codon erkannt wird, sind offenbar nicht alle diese Elemente ausgebildet, sodass es trotz des Vorliegens einer verzerrten tRNA-Struktur nicht zur vollen GTPase-Aktivierung kommt.^[10]

Im Vergleich mit der GTP-Hydrolyse ist die strukturelle Basis der codon-spezifischen Beschleunigung der Peptidverknüpfung weniger gut verstanden. Kinetisch wird die Reaktion limitiert durch die Akkommodierung der Aa-tRNA im Peptidyltransferase-Zentrum.^[6] Molekulardynamische Berechnungen deuten auf eine schrittweise Akkommodierung hin, bei der sich die tRNA durch einen Korridor konservierter rRNA-Basen bewegt.^[11] Die korrekte Ausrichtung des Anticodons im Decodierungszentrum führt zu schneller Akkommodierung. Offenbar sind die Anticodons inkorrekturer tRNAs nicht optimal ausgerichtet, sodass auch die Ausrichtung des Akzeptor-Arms und seine Bewegung durch den Akkommodierungskorridor beeinträchtigt sein könnte. Neben diesen möglichen Beeinträchtigungen an der Eingangspforte könnte eine falsche Ausrichtung des Anticodon-Arms auch die sonstigen Wechselwirkungen zwischen tRNA-Molekül und Ribosom stören^[12] und damit die Akkommodierung der fast-korrekten Aa-tRNA behindern und ihre Dissoziation fördern.

Das Ribosom als Ribozym

Das Ribosom beschleunigt die Peptidverknüpfung um einen Faktor von 10^7 bis 10^8 , ist also – wie Ribozyme generell – ein weniger effizienter Katalysator als viele Proteinenzyme, die Beschleunigungen um bis zu 10^{23} -fach erreichen. Die intrinsische Geschwindigkeit der Peptidverknüpfung ist kinetisch durch die deutlich langsamere Akkommodierung der Aa-tRNA limitiert. Dies ist vermutlich auch der Grund dafür, dass die RNA-basierte, entropische Katalyse in der Evolution vom präbiotischen Ribozym zum modernen Ribosom beibehalten werden konnte. Dagegen musste die Genauigkeit mit zunehmender Größe und funktioneller Komplexität der Produkte des Translationsapparats erhöht werden. Der wesentliche Schritt war die Kopplung der Substratbindung an die Hydrolyse von GTP durch das Hinzutreten einer GTPase, die Aa-tRNA nur zur Peptidverknüpfung zulässt, wenn die Qualität der Anticodon-Codon-Passung geprüft ist – sogar doppelt, nämlich in der initialen Selektion und im *proofreading*. Eine wesentliche Rolle spielt dabei das Ribosom selbst, das die korrekte Anticodon-Codon-Paarung erkennt und die dadurch induzierten komplexen Strukturveränderungen zur Aktivierung der GTPase von EF-Tu umsetzt – ein Beispiel für ein System, das durch Koevolution optimiert wurde.

Literatur

- [1] Rodnina M. V., Wintermeyer W. (2001) Fidelity of aminoacyl-tRNA selection on the ribosome: kinetic and structural mechanisms. *Annual Review of Biochemistry* 70, S. 415-435.
- [2] Zaher H. S., Green R. (2009) Quality control by the ribosome following peptide bond formation. *Nature* 457, S. 161-166.
- [3] Pape T., Wintermeyer W., Rodnina M. (1999) Induced fit in initial selection and proofreading of aminoacyl-tRNA on the ribosome. *EMBO Journal* 18, S. 3800-3807.
- [4] Gromadski K. B., Daviter T., Rodnina M. V. (2006) A uniform response to mismatches in codon-anticodon complexes ensures ribosomal fidelity. *Molecular Cell* 21, S. 369-377.
- [5] Ledoux S., Uhlenbeck O. C. (2008) Different aa-tRNAs are selected uniformly on the ribosome. *Molecular Cell* 31, S. 114-123.
- [6] Wohlgemuth I., Pohl C., Rodnina M. V. (2010) Optimization of speed and accuracy of decoding in translation. *EMBO Journal* 29, S. 3701-3709.

- [7] Voorhees R. M., Schmeing T. M., Kelley A. C., Ramakrishnan V. (2010) The mechanism for activation of GTP hydrolysis on the ribosome. *Science* 330, S. 835-838.
- [8] Schmeing T. M., Ramakrishnan V. (2009) What recent ribosome structures have revealed about the mechanism of translation. *Nature* 461, S. 1234-1242.
- [9] Zaher H. S., Green R. (2009) Fidelity at the molecular level: lessons from protein synthesis. *Cell* 136, S. 746-762.
- [10] Mittelstaet J., Konevega A. L., Rodnina M. V. (2011) Distortion of tRNA upon near-cognate codon recognition on the ribosome. *Journal of Biological Chemistry* 286, S. 8158-8164.
- [11] Sanbonmatsu K. Y., Joseph S., Tung C. S. (2005) Simulating movement of tRNA into the ribosome during decoding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 102, S. 15854-15859.
- [12] Jenner L., Demeshkina N., Yusupova G., Yusupov M. (2010) Structural rearrangements of the ribosome at the tRNA proofreading step. *Nature Structural & Molecular Biology*. 17, S. 1072-1078.

Arnulf Quadt

Dem Higgs-Boson auf der Spur

Aktuelle Ergebnisse am *Large Hadron Collider*¹

Physik beschäftigt sich mit der unbelebten Natur von den größten Strukturen des Universums bis zu den kleinsten Bausteinen des Mikrokosmos (Abb. 1). Das Universum an sich mit seiner Entstehungsgeschichte und die Dynamik ganzer Galaxien mit einer Größe von 10^5 Lichtjahren werden in der Kosmologie und Astrophysik untersucht. Dazu werden erd- oder satellitengestützte Teleskope eingesetzt. Planeten wie unsere Erde haben eine Größe von 10^7 m und lassen sich schon sehr gut mit einfachen Hobby-Teleskopen betrachten. Menschen und Tiere in der Größenordnung 1-2 m lassen sich mit dem bloßen Auge erkennen, während wir kleine Tiere und Pflanzen oder einzelne Zellen mit optischen Mikroskopen untersuchen. Atome bilden mit dem Periodensystem der Elemente die Grundlage der Chemie und haben eine Größe von 10^{-10} m. Sie sind zu klein, als dass man sie buchstäblich sehen könnte. Allerdings lassen sich ihre Größe und die räumliche Struktur ihrer Ladungs- und Masseverteilung mit Hilfe von Streuexperimenten untersuchen. Während die negativ geladene Atomhülle aus Elektronen besteht, die wir heute noch als elementar ansehen, ist die Atommasse fast vollständig im positiv geladenen Atomkern konzentriert. Dieser besteht aus einer Kombination von Protonen und Neutronen, die etwa 10^{-15} m groß sind und ihrerseits eine Substruktur aus so genannten Quarks besitzen. Letztere sehen wir heute als elementare Bausteine an. Die Eigenschaften dieser fundamentalen Bausteine der Natur und ihre Wechselwirkungen lassen sich in Streuexperimenten, also in Teilchenkollisionen, mit Hilfe großer und äußerst komplexer Teilchendetektoren mit modernster Messtechnologie untersuchen. Man kann also zusammenfassen, dass die Ziele der Elementarteilchenphysik das Verständnis der Natur sind, von den größten Dimensionen des Universums bis zu den kleinsten Dimensionen des Mikrokosmos. Entsprechend dem Reduktionsprinzip soll dieses Verständnis auf möglichst wenigen, fundamentalen

1 Vortrag beim XLAB Science Festival 2013.

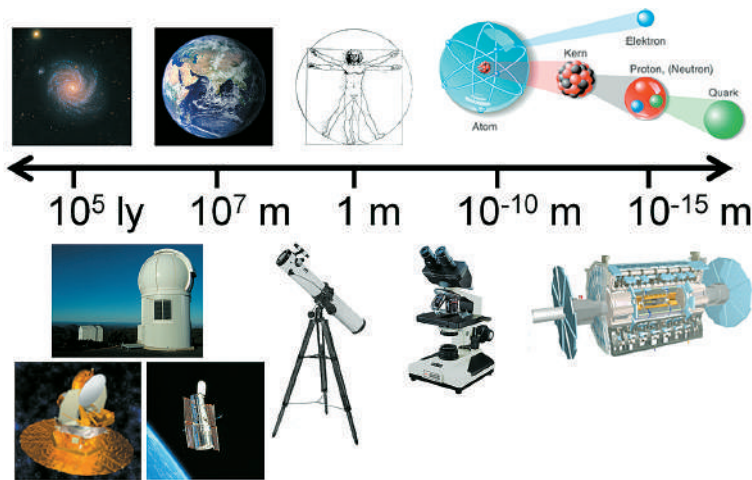


Abbildung 1: Die Größenordnungen physikalischer Objekte und die Instrumente zu ihrer Untersuchung. ly = Lichtjahr (*light year*).

Bausteinen und deren Wechselwirkungen, also den Kräften zwischen ihnen, beruhen.

Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

Die Beschreibung dieser Wechselwirkungen wird mit Hilfe einer Symbolsprache über Feynman-Diagramme beschrieben. Dabei entsprechen die einzelnen Linien Elementarteilchen, die durch Austausch von Eichbosonen miteinander wechselwirken. Das können wir uns einfach so vorstellen, dass Sie und ich je ein Elementarteilchen darstellen. Wir befinden uns jeweils in einem Ruderboot auf einem See. Wenn ich Ihnen ein kleines Objekt, wie z.B. einen Schlüssel, zuwerfe, erfahre ich beim Loslassen des Schlüssels einen kleinen Rückstoß. Sobald Sie den Schlüssel auffangen, nehmen Sie dessen Schwung (wir sagen: Impuls) auf und bewegen sich ebenfalls zurück. Werfen wir den Schlüssel ein paar Mal hin und her, erzeugen wir letztendlich eine abstoßende Kraft. Werfen wir statt des Schlüssels einen Bumerang, der uns jeweils von hinten trifft, realisieren wir eine anziehende Kraft. Tauschen wir statt des Schlüssels einen schweren Medizinball aus, wird die Kraft deutlich stär-

ker, besitzt aber nur noch eine sehr geringe Reichweite. Damit haben wir die wesentlichen Aspekte der Quantenfeldtheorie verstanden, für die Wissenschaftler vor etwa 70 Jahren mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Vor ziemlich genau 100 Jahren (1912) hat Ernest Rutherford sein berühmtes Streuexperiment durchgeführt. Er hat Alpha-Teilchen auf eine dünne Lage von Goldatomen geschossen und aus der Verteilung der Richtung, in der die Alpha-Teilchen abprallten, geschlossen, welche innere Struktur und Ladungs- bzw. Masseverteilung Atome haben und wie groß der Atomkern ist. Ähnlich ist es, wenn wir einen Fußball gegen eine Wand schießen. Kommt er direkt zu uns zurück, haben wir die massive Wand getroffen. Fliegt der Ball geradeaus weiter, haben wir ein offenes Fenster oder eine Tür getroffen. Springt der Ball in irgendeiner Richtung zurück, haben wir vermutlich einen Türrahmen getroffen. So kann man sich aus der Ferne ein Bild von der Struktur eines Objektes machen, auch wenn man es nicht direkt sehen kann. Um 1860 war das zweidimensionale Ordnungsschema des Periodensystems der Elemente aus Haupt- und Nebengruppen bekannt. Man konnte damit Vorhersagen über die Existenz und chemischen Eigenschaften von bis dato unbekannten Elementen machen. Wie sich durch Rutherford dann zeigte, liegt die Erklärung in der räumlichen Struktur der Bausteine von Atomen. Die Atomkerne bestimmen die Masse von Atomen, während allein die Elektronen der äußeren Atomshalen deren chemische Eigenschaften definieren. In den 1950er und 1960er Jahren wurde geradezu ein »Zoo« neuer Teilchen entdeckt. Ordnet man diese entsprechend ihrer Eigenschaften an, erhält man dreidimensionale Strukturen, die man wiederum durch räumliche Kombinationen von kleinen fundamentalen Bausteinen, hier insbesondere den Quarks, verstehen kann. Heute besteht also unser Baukasten der Natur aus sechs Quarks und sechs Leptonen. Das schwerste Quark ist das Top-Quark. Es wurde erst 1995 experimentell entdeckt. Das Tau-Neutrino ist das zuletzt entdeckte Lepton. Weil es so selten wechselwirkt, konnte es erst im Jahr 2000 direkt nachgewiesen werden. Obwohl unsere Theorie, das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, die erfolgreichste und präziseste Theorie der Naturwissenschaften ist, ist sie doch unvollständig. Sie beschreibt nämlich alle diese Elementarteilchen als masselos, obwohl wir wissen, dass sie eine Masse haben. Dies könnte der Higgs-Mechanismus mit dem seit 50 Jahren gesuchten Higgs-Boson erklären.

Woher kommt die Masse?

Die Natur ist voller Symmetrien. Dies nutzen wir sehr gerne in der mathematischen Beschreibung der Physik aus. Wie wir von Emmy Noether gelernt haben, erfüllen Naturgesetze mit kontinuierlichen Symmetrien immer bestimmte Erhaltungssätze. Gesetze, die nur auf Zeitdifferenzen, nicht aber auf eine absolute Zeit sensitiv sind, erhalten z.B. immer die Gesamtenergie. Es gibt aber auch kleine Asymmetrien, die wir Symmetriebrechung nennen. Diese erzeugen neue physikalische Phänomene. Betrachten wir zunächst noch einmal Symmetrien im Mikrokosmos, kommt man sofort auf die vier fundamentalen Kräfte der Natur: Die elektromagnetische Kraft wird durch den Austausch von Photonen vermittelt und ist verantwortlich für Licht, Strom, elektrostatische Anziehung oder Abstoßung und magnetische Effekte, wie das Anziehen der Magnete bei der Lego-Eisenbahn. Die starke Kraft wird durch den Austausch von Gluonen vermittelt und bewirkt, dass mehrere Protonen und Neutronen in einem Atomkern sich stärker anziehen, als sich die Protonen aufgrund ihrer gleichen positiven Ladung abstoßen, so dass größere Atomkerne stabil existieren können. Die schwache Kraft wird durch den Austausch von $W^\pm$ - und Z -Bosonen vermittelt und ist z.B. für radioaktive Zerfälle und das Brennen der Sonne verantwortlich. Vermutlich ist die Gravitation eine Konsequenz aus dem Austausch von Gravitonen. Diese sind aber bisher nicht experimentell nachgewiesen. Die Gravitation ist bis heute quantenmechanisch nicht verstanden. Aber auch in der Natur gibt es zahlreiche Beispiele für Asymmetrien. Schaut man sich z.B. die Blüten und später die Kerne einer Sonnenblume an, stellt man fest, dass diese auf Spiralbahnen liegen, von denen 34 im und 21 gegen den Uhrzeigersinn laufen. Die Sonnenblume ist asymmetrisch, sie kann links und rechts unterscheiden. Ähnlich ist das bei Ananas, Romanesco oder Gänseblümchen. Ordnet man die dabei auftretenden Zahlen von Spiralen in eine aufsteigende Zahlenfolge, erhält man die Fibonacci-Zahlen (jede Zahl ist die Summe der beiden vorherigen Zahlen): 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 usw. Teilt man von je zwei benachbarten Zahlen die größere durch die kleinere, erhält man sehr schnell ein stabiles Verhältnis von etwa 1,61, den so genannten goldenen Schnitt. Dieser spielt in der Kunst und Architektur eine große Rolle und wird von Menschen als schön empfunden, weil er in der Natur so oft vorkommt. Der goldene Schnitt teilt eine Strecke in eine größere und eine kleinere Teilstrecke, bewirkt also

auch eine Asymmetrie. Im Mikrokosmos gibt es Asymmetrien wie z.B. die elektroschwache Symmetriebrechung, die den Higgs-Mechanismus bewirkt. Dieser könnte das Phänomen der Masse, also der Trägheit von Elementarteilchen, erklären. In einer Analogie stellen wir uns vor, dass das Higgs-Feld, das den gesamten Raum im Universum ausfüllt, durch Journalisten auf einer Cocktail-Party dargestellt wird. Bewegt sich nun eine berühmte Person, unser Elementarteilchen, durch den Raum, drängen sich die Journalisten um die Berühmtheit, um dieser Fragen zu stellen oder ein Autogramm zu erhaschen. In Bewegungsrichtung kommen immer neue Journalisten dazu, während in der anderen Richtung Journalisten aufgeben und loslassen. Wir sagen, dass das Higgs-Feld wie eine klebrige Substanz an das Elementarteilchen koppelt und dieses bei gleichem Schwung langsamer, also träger wird. Dieses Phänomen nennen wir Masse. Um diesen Mechanismus zu bestätigen und die Eigenschaften des Higgs-Feldes zu untersuchen, können wir das Higgs-Feld durch Teilchenkollisionen anregen. In unserem Bild entspricht das dem Streuen eines Gerüchtes, das durch den Zustand aneinandergedrängter Journalisten, die das Gerücht austauschen, beschrieben wird. Dieser Zustand entspricht dem Higgs-Teilchen. Entdecken wir es und vermessen seine Eigenschaften, verstehen wir letztlich die Eigenschaften des Higgs-Feldes und des gesamten Massen-Mechanismus.

Moderne Experimente mit Teilchenkollisionen

In der Entstehungsgeschichte des Universums knapp 15 Milliarden Jahre nach dem Urknall haben die Elementarteilchen eine Art heiße Ursuppe gebildet. Sie sind dabei mit unterschiedlicher Energie, also bei allen möglichen Temperaturen, unkontrolliert mit Teilchen aller anderen Sorten zusammengestoßen und haben sich dabei umgewandelt. Im Labor wählen wir die Teilchensorten gezielt aus und stellen deren Energie nach Belieben ein. Wir messen die Teilchen, die bei den einzelnen Kollisionen entstehen, und machen das bei allen möglichen Energien und mit allen möglichen Teilchensorten. Insgesamt werden wir dann in etwa die Entstehungsgeschichte des Universums und die Tatsache verstehen, weshalb wir aus Materie und nicht aus Antimaterie bestehen. Für solche Experimente müssen wir Teilchen auf hohe Temperatur bringen, also auf hohe Energie beschleunigen. Teilchenquelle, Steuer-



Abbildung 2: Ein Blick in den Tunnel des *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN in Genf. Bildnachweis: Maximilien Brice, CERN.

magnete und Teilchennachweis sind dabei vergleichbar einem alten Röhrenfernseher. Allerdings verwenden wir heute zur Beschleunigung keine statische Hochspannung, sondern lassen die Teilchen auf elektromagnetischen Mikrowellen, ähnlich einem Wellenreiter auf einer Wasserwelle, »reiten«. Der Aufwand für solche Experimente ist sehr groß, so dass es weltweit nur eine Handvoll davon gibt, z.B. das *Fermilab* in Chicago, das DESY in Hamburg, das KEK in Tsukuba/Japan und das europäische Zentrum für Kernphysik, das CERN in Genf. Auf dem CERN-Gelände findet man mehrere kreisförmige Beschleuniger. Das Protonsynchrotron (PS) wurde 1954 gebaut und dient heute noch als Vorbeschleuniger. Das Superprotonsynchrotron (SPPS) ging Anfang der 1980er Jahre in Betrieb und ist ebenfalls ein LHC-Vorbeschleuniger. In seinen Experimenten wurden das W- und das Z-Boson entdeckt, was mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Der *Large Hadron Collider* (LHC) ist ein Proton-Proton-Kreisbeschleuniger, 27 km im Umfang und etwa 100 m unter der Erde (Abb. 2). Bei einer Schwerpunktsenergie, die aktuell 7.000 und ab 2015 14.000 Protonenmassen (Einheit GeV) entspricht, finden alle 25 Nanosekunden Proton-Proton-Kollisionen statt. Diese 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde werden

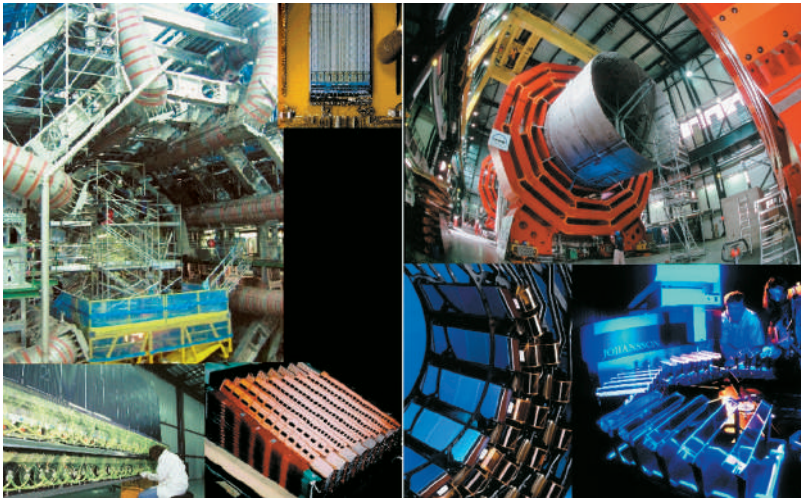


Abbildung 3: Verschiedene Detektorkomponenten während der Bauphase. Links: ATLAS, rechts: CMS. Bildnachweise: CERN.

von den Experimenten ATLAS, CMS, ALICE und LHC-B aufgezeichnet und untersucht.

Meine Arbeitsgruppe in Göttingen ist dabei am ATLAS-Experiment beteiligt. ATLAS ist etwa 50 m lang, 25 m hoch und etwa 7.000 Tonnen schwer. Wie ein Buddelschiff wurde das Experiment über viele Jahre gebaut, indem die einzelnen Bauteile über einen relativ schmalen Zugangsschacht 100 m unter die Erde in die Experimentierhalle gebracht und dort montiert wurden (Abb. 3). Im September 2008 wurde unter Live-Beobachtung der Medien weltweit der erste Strahl in den LHC injiziert. Aufgrund eines technischen Defekts wurde der LHC dann ein Jahr lang repariert und ging am 20. November 2009 erneut in Betrieb. Am 23. November 2009 gab es dann die ersten Kollisionen von zwei entgegengesetzt umlaufenden Protonenstrahlen bei 900 GeV Energie, Ende März 2010 die ersten Kollisionen bei 7.000 GeV Energie. Dieser Erfolg wurde gebührend gefeiert und definiert den Beginn einer neuen Ära. Seitdem wurde eine Vielzahl von Kollisionen aufgezeichnet, wobei etwa in einer von 10^{11} die Produktion eines Higgs-Teilchens erwartet wird. Dieses eine Kollisionsereignis darf man auf keinen Fall verpassen, was buchstäblich der Suche nach der Nadel im Heuhaufen gleicht.

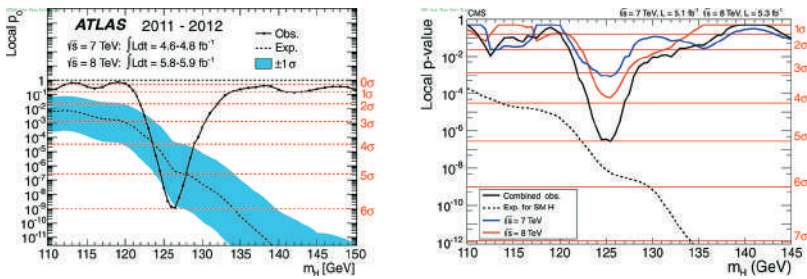


Abbildung 4: Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei den Beobachtungen um eine zufällige statistische Fluktuation des Untergrundes und nicht um die Entdeckung eines neuen Teilchens handelt, als Funktion der hypothetischen Masse des Higgs-Bosons. Links: ATLAS-Ergebnisse, rechts: CMS-Ergebnisse. Bildnachweis: Phys. Lett. B, 716.

Entdeckung des Higgs-Teilchens im Juli 2012

Das Higgs-Teilchen ist sehr kurzlebig und zerfällt sofort in andere Teilchenpaare, wie z.B. ein Photonenpaar, ein Z-Bosonen-Paar oder ein W-Bosonen-Paar. In allen diesen so genannten Zerfallskanälen haben die Experimente ATLAS und CMS nach dem Higgs-Teilchen gesucht und mehr oder weniger starke Anzeichen dafür gefunden. Die einzelnen Kandidaten-Ereignisse für die Higgs-Produktion mit anschließendem Zerfall sind sehr sauber und starke Indizien. Kombiniert man die verschiedenen Suchkanäle innerhalb von ATLAS bzw. innerhalb von CMS, sind die Anzeichen für die Produktion eines neuen Higgs-artigen Bosons mit einer Masse von 125 GeV so stark, dass die Wahrscheinlichkeit, dass es sich doch nicht um die Entdeckung eines neuen Teilchens, sondern nur um eine zufällige statistische Fluktuation der Untergrundprozesse handelt, den winzigen Wert von $1 : 2.000.000$ erreicht hat.^[1,2] Dies entspricht einer Signifikanz der Messung von 5 Gauß'schen Standardabweichungen, was nach den Konventionen in der Physik als »Entdeckung« bezeichnet wird (Abb. 4, 5).

Diese Jahrhundertentdeckung von ATLAS und CMS jeweils einzeln ist in der Kombination noch signifikanter. Sie wurde in einem speziellen Seminar am CERN, das live per Internet an zahlreiche Standorte in aller Welt – auch nach Göttingen – übertragen wurde, am 4. Juli 2012 verkündet. Der CERN-Generaldirektor Prof. Dr. Rolf-Dieter Heuer

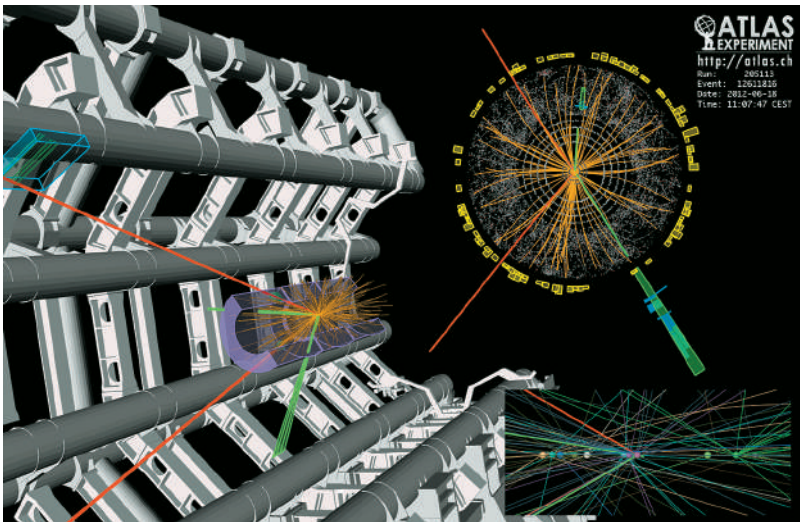


Abbildung 5: Kandidatenereignis in ATLAS für den Prozess $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow e\bar{e}\mu\mu$. Bildnachweis: ATLAS Collaboration/CERN.

hat dazu erklärt: »Als Laie würde ich jetzt sagen: Wir haben es endlich gefunden! Als Wissenschaftler sage ich: Wir müssen die Eigenschaften des neu entdeckten Teilchens untersuchen, um festzustellen, ob es in jeglicher Hinsicht mit den Vorhersagen des Standardmodells übereinstimmt und es sich wirklich um das Standardmodell-Higgs-Boson handelt.« Nach 50 Jahren Suche ist nun dieses neue, einzigartige Teilchen entdeckt worden. Viele Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen vergleichen die Entdeckung mit der Mondlandung und beschreiben das CERN-Seminar vom 4. Juli 2012 in Anlehnung an den Ausspruch von Neil Armstrong als weiteren »gigantischen Schritt der Menschheit«.

Aufgabe für junge Physiker

Der *Large Hadron Collider* am CERN in Genf ist mit Göttinger Beteiligung äußerst erfolgreich gestartet. Die Jahre 2010–2012 waren die Jahre der Higgs-Suche. Am 4. Juli 2012 haben die beiden CERN-Experimente ATLAS und CMS die Entdeckung eines neuen, Higgs-artigen Bosons mit einer Masse von etwa 125 GeV verkündet. Die genaue

Untersuchung seiner Eigenschaften und die Beantwortung der Frage, ob sich es dabei um das vom Standardmodell vorhergesagte Higgs-Teilchen handelt, wird die Aufgabe für die Teilchenphysik der nächsten Jahre sein. Junge Teilchenphysiker erhalten die Möglichkeit, mitzuforschen. Machen Sie mit!

Literatur

- [1] ATLAS Collaboration (2012) Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, Phys. Lett. B, 716, S. 1-29.
- [2] CMS Collaboration (2012) Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, Phys. Lett. B, 716, S. 30-61.

Jürgen Tautz

Superorganismus Bienenstaat

Der Bien – ein Säugetier mit vielen Körpern¹

Nach allen gängigen Kriterien sind Honigbienen seit ihrem ersten Auftauchen vor geschätzten 30 Millionen Jahren Insekten – kein Zweifel. Im 19. Jahrhundert kam aufgrund eines drastischen Vergleiches des Imkers und Schreinermeisters Johannes Mehring (1815-1878) eine völlig neue Sichtweise hinzu: Das Bienenvolk sei ein »Einwesen«, formulierte dieser. Es entspreche einem Wirbeltier. Die Arbeitsbienen seien der Gesamtkörper, seine Erhaltungs- und Verdauungsorgane. Die Königin entspräche den weiblichen, die Drohnen den männlichen Geschlechtsorganen (Mehring zitiert von Gerstung in A. Ludwig »Unsere Bienen«, 1922).

Diese Sichtweise, eine ganze Bienenkolonie mit einem einzigen Tier gleichzusetzen, brachte den Begriff des »Bien« hervor, womit die »organische Auffassung des Einwesens« ausgedrückt werden sollte, die eine Bienenkolonie als ein unteilbares Ganzes, als einen einzigen lebenden Organismus betrachtet.^[6] Für diese Lebensform hat der amerikanische Biologe William Morton Wheeler (1865-1937), resultierend aus seinen Arbeiten an Ameisen, dann 1911 den Begriff des »Superorganismus« geprägt (Wortstamm: lat. *super* = darüber, über hinaus; griech. *organon* = Werkzeug).^[9] Puristische Etymologen hätten sicher alternativ den Begriff Hyperorganismus (Wortstamm: griech. *hyper* = darüber, über hinaus; griech. *organon* = Werkzeug) bevorzugt, aber sie kommen nun zu spät. »Superorganismus« ist als Begriff etabliert.

Ich möchte diese kluge, auf einer gründlichen Naturbeobachtung durch die alten Imker basierende Vorstellung von einer Bienenkolonie als einem Superorganismus auf die Spitze treiben und behaupten: Der Staat der Honigbienen ist nicht nur »ein Wirbeltier«, er hat sogar entscheidende Eigenschaften von Säugetieren.^[8]

1 Jürgen Tautz: Superorganismus Bienenstaat. Der Bien – ein Säugetier mit vielen Körpern. Biologie in unserer Zeit 2008. Vol. 38, S. 22-29. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.



Abbildung 1: Ein Bienenvolk bringt im Jahr nur sehr wenige Jungköniginnen hervor. Die neuen Königinnen entstehen in besonders gebauten Zellen, den Weiselwiegen. Foto: Helga R. Heilmann.

Diese Aussage, die zunächst weit hergeholt erscheinen mag, mutet nicht mehr so seltsam an, wenn man nicht vom Körperbau der Honigbienen und ihrer stammesgeschichtlichen Entstehung ausgeht, sondern die Bienen auf das Vorhandensein der wesentlichen evolutiven Schlüsselmerkmale abklopft, auf die sich die Überlegenheit der Säugetiere gegenüber anderen Wirbeltiergruppen begründet.

Säugetiere lassen sich durch die Kombination der folgenden Eigenschaften und Neuerfindungen von anderen Wirbeltieren abgrenzen:



Abbildung 2: Die Larven der Bienen leben in einem Schlaraffenland. Sie schwimmen auf einem Futtersaft, der von Ammenbienen erzeugt worden ist. Foto: Helga R. Heilmann.

- Sie haben eine extrem niedrige Vermehrungsrate – Honigbienen ebenfalls (Abb. 1).
- Säugetierweibchen erzeugen in speziellen Drüsen Muttermilch – Honigbienenweibchen erzeugen in speziellen Drüsen Schwesternmilch (Gelée Royale) (Abb. 2). Die Milch dient bei Säugetieren und Honigbienen als *design food* zur Versorgung des Nachwuchses mit Energie und Rohstoffen und schützt außerdem vor Krankheitserregern, bis das körpereigene Immunsystem der Neugeborenen funktioniert.

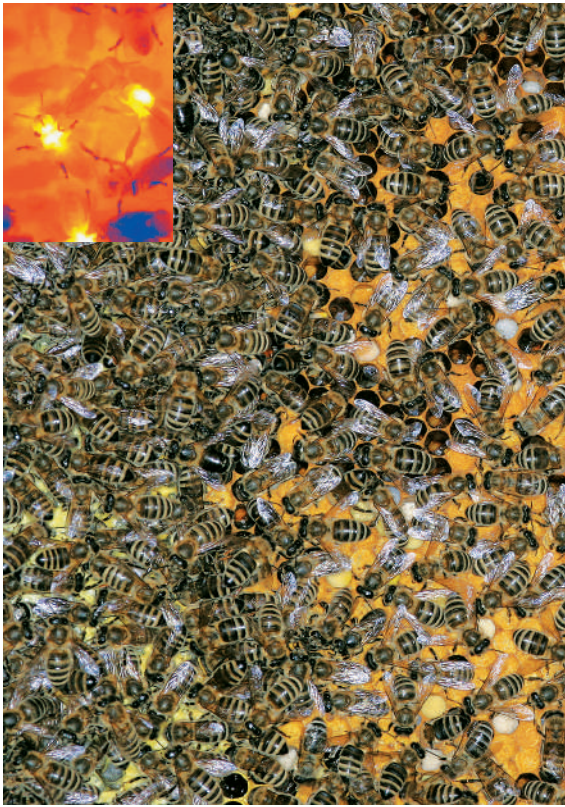


Abbildung 3: Das Brutnest wird von den erwachsenen Bienen in seinen mikro-klimatischen Eigenschaften eindrucksvoll kontrolliert. Oben links: Ihre Puppen halten Heizerbienen auf einer Körpertemperatur, die von der Körpertemperatur der Säugetiere im Idealfall um nicht mehr als 1°C abweicht. Die Falschfarbendarstellung durch die Wärmekamera zeigt die wärmeerzeugende Flugmuskulatur in weißer Farbe. Fotos: Helga R. Heilmann.

- Losgelöst von einer Außenwelt mit schwankenden Eigenschaften, bieten Säugetiere ihren sich entwickelnden Nachkommen eine schützende, exakt eingestellte Umwelt im Uterus der Mütter – Honigbienen bieten ihren Jugendstadien den gleichen Schutz und die gleiche konstante Umwelt im Bienennest (Abb. 3).
- Säugetiere haben eine Körpertemperatur von etwa 36°C – Honigbienen halten ihre Puppen auf einer Körpertemperatur von etwa 35°C (Abb. 3 oben links).



Abbildung 4: Bienen lernen sehr rasch, wo und wann welche Blüte Nektar liefert und wie sie zur optimalen Ausbeutung behandelt werden muss. Foto: Helga R. Heilmann.

- Säugetiere besitzen mit ihren großen Gehirnen die höchste Lernfähigkeit und die ausgeprägtesten kognitiven Eigenschaften unter den Wirbeltieren. Honigbienen besitzen eine ausnehmend hoch entwickelte Veranlagung zum Lernen sowie kognitive Eigenschaften, mit denen sie sogar so manche Wirbeltiere in den Schatten stellen (Abb. 4).

Ist es nicht verblüffend, dass diese Liste an prinzipiellen Erfindungen, durch die sich die Säugetiere, uns Menschen eingeschlossen, charakterisieren lassen, auch für den Bienenstaat zutrifft? Der Nachweis, dass ein Volk von Honigbienen als »Säugetier ehrenhalber« angesehen werden kann, oder besser gesagt, dass im Superorganismus Bienenstaat entscheidende funktionelle Merkmale der Säugetiere ebenfalls vorliegen, erweckt den Verdacht, dass mehr dahinter stecken könnte als oberflächliche Ähnlichkeiten. Man könnte kritisch bemerken, dass sich auch leicht Gemeinsamkeiten von Fledermaus und Mistkäfer finden lassen: Beide können fliegen, beide können sehen, beide werden steif, wenn es sehr kalt wird. Allerdings erhalten die beiden Organismen durch diese Kennzeichen keine Exklusivität, sie taugen nicht zur Hervorhebung besonderer Leistungen und der Resultate, die damit erreicht werden können.

Um in der Liste der Gemeinsamkeiten zwischen Säugetieren und Honigbienen mehr als verblüffend klingende, vielleicht bedeutungslose oder einfach nur zusammengesuchte Analogien zu sehen, beginnt man am besten mit der Frage nach dem »Wozu« dieser gemeinsamen Eigenschaften. Am Ausgangspunkt dieser Erkundungsreise steht die Überzeugung, dass es sinnvoll ist, nach wichtigen Problemen zu suchen, für die unterschiedliche Tiergruppen offenbar gleiche Lösungen gefunden haben. Eine Organismengruppe ist Konkurrenten gegenüber um so mehr im Vorteil, je unabhängiger sie zur langfristigen Existenzsicherung von den Zufällen der Umwelt ist. Umweltfaktoren können unvorhersehbar schwanken. Wirken diese unberechenbaren Umweltfaktoren auf Eigenschaften in einer Population, bewerten sie diese Eigenschaften, indem sie als Selektionsfaktoren das Überleben und die Fortpflanzung der verschiedenen Typen bestimmen. Die Erfolgreichen und besser Angepassten werden sich ausbreiten, die weniger Erfolgreichen und weniger gut Angepassten werden verschwinden. Das ist der Kern der Darwin'schen Theorie über den Mechanismus der Evolution.

Die aufgeführten Eigenschaften gewähren den Säugetieren wie den Honigbienen eine weitgehende Unabhängigkeit von aktuellen Umweltbedingungen wie beispielsweise einem schwankenden Energieangebot der Umgebung (durch eine aktive Vorratswirtschaft), schwankender Nahrungsqualität (durch selbsterzeugte Nahrung), Schutz vor Feinden (durch die Errichtung schützender Lebensräume) und Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen (durch die Einstellung geeigneter Klimawerte im selbst geschaffenen Lebensraum). Diese Unabhän-

gigkeit wird durch einen entsprechenden Aufwand an Materie und Energie sowie eine komplexe Organisation zur »Verwaltung« des Ganzen erreicht. Eine niedrige Vermehrungsrate kann als Folge dieser kontrollierten optimalen Lebensbedingungen aufgefasst werden. Organismen mit niedriger Vermehrungsrate, die sehr konkurrenzstark sind, erreichen durch die geringe Nachkommenzahl eine stabile Populationsgröße im Rahmen der Möglichkeiten, die das Habitat bietet. Sie können sich aber bei Veränderungen der Umweltbedingungen aufgrund der geringen Nachkommenzahl schlecht anpassen. Es sei denn, dieses Problem tritt erst gar nicht auf, weil man kritische Umweltfaktoren »im Griff« hat, weil man Teile seiner ökologischen Nische selbst erschaffen hat und ihre Aufrechterhaltung kontrollieren kann.

Ein einzelnes Insekt zeigt keine der aufgeführten säugetierartigen Eigenschaften. Offenbar sind viele Bienenindividuen nötig, um in der Gemeinschaftsleistung eines Superorganismus ein »Säugetier mit vielen Körpern« zu erstellen. Wieso haben die Honigbienen, genau wie die Zellen eines Körpers, ihre Selbständigkeit aufgegeben und sich zu Superorganismen zusammengeschlossen? Was hat sie zu diesem Schritt gebracht? Was gewinnen sie dabei?

Der Bien, ein komplexes adaptives System

Die Verhältnisse und Vorgänge in einem Bienenvolk sind hochkomplex, da ständig gleichzeitig von tausenden Bienen kleine Verhaltensbausteine beigetragen werden, die sich zum Gesamtverhalten der Kolonie zusammenfügen.

Komplexe biologische Systeme passen sich in kurzen Zeiträumen durch ihre Plastizität und in langen Zeiträumen durch die Evolution an relevante Aspekte der Umwelt an, sie besitzen die Fähigkeit zur Adaptation.

Unter einem komplexen adaptiven System versteht man, wenn man der sehr technischen Definition von John H. Holland (geb. 1929) folgt, »... ein dynamisches Netzwerk mit vielen Akteuren (sie können Zellen, Spezies, Individuen, Firmen oder auch Nationen repräsentieren), die parallel und ständig agieren und reagieren auf das, was die anderen Akteure machen. Die Kontrolle eines komplexen adaptiven Systems tendiert dazu, verstreut und dezentralisiert zu sein. Wenn es ein zusammenhängendes Verhalten im System geben soll, muss dies aus dem

Wettbewerb und der Kooperation der Akteure kommen. Das Verhalten des gesamten Systems ist das Resultat einer großen Anzahl von Entscheidungen, die von vielen einzelnen Agenten getroffen werden.«

Als Bienenforscher ist man begeistert, wenn man diese zugegebenermaßen trockene Festlegung vor sich hat, die man mehrmals durchlesen muss, um alle Facetten zu erfassen. Denn sie gibt einen theoretischen Rahmen für die Einordnung des »Phänomens Honigbiene« unter allen vorstellbaren Systemen und sie bestätigt Eindrücke, die man bei der Beschäftigung mit Honigbienen intuitiv bekommt. Würde ein Bienenforscher versuchen, die besonderen Eigenschaften des Superorganismus Bienenstaat herauszukristallisieren, könnte die folgende Charakterisierung zu Stande kommen, die sich Punkt für Punkt mit der abstrakten Definition Hollands decken würde: Der Superorganismus Bienenstaat ist eine anpassungsfähige komplexe Tiergemeinschaft, bestehend aus vielen tausend Einzeltieren, die ständig aktiv sind und in ihren Handlungen auf Gegebenheiten ihrer Umwelt und die Aktivitäten ihrer Nestgenossinnen reagieren. Eine übergeordnete Kontrollinstanz ist nicht vorhanden, sondern das Gesamtverhalten der Kolonie entsteht aus Kooperation und Konkurrenz der Bienen untereinander.

Ein komplexes adaptives System wie der Superorganismus Bienenstaat zeigt die Fähigkeit zur Selbstorganisation und zur Emergenzbildung. Emergenzen sind Eigenschaften, die wir auf dem Niveau der einzelnen Bausteine des komplexen Systems nicht finden und die erst in der Wechselwirkung zwischen Bausteinen entstehen.^[1] Um sich als Bien emergent wie ein Säugetier darzustellen, müssen sich viele Bienenindividuen zusammenschließen.

Was brachte den Bien zusammen?

Der große Evolutionsbiologe Charles Darwin (1809-1882) hat in der Existenz der Honigbienen ein Problem gesehen, das seine gesamte Evolutionstheorie in Bedrängnis bringen könnte. Nach seiner Auffassung zum Ablauf der Evolution ist deren erste Voraussetzung eine Anzahl an Nachkommen, die größer ist, als zur Bestandserhaltung unbedingt erforderlich. Nur wenn es entsprechend viele Nachkommen gibt und wenn diese unterschiedlich ausfallen, kann der nächste Schritt, die Selektion, erfolgen. Mit den Honigbienen war er aber mit einem Organismus konfrontiert, bei dem bis auf die einzige Ausnahme in Form der

Königin alle Weibchen eines Volkes keine eigenen Nachkommen haben. So schrieb Darwin in seinem großen Werk »Die Entstehung von Arten«, dass die Honigbienenarbeiterinnen sehr schwierig in seiner Theorie unterzubringen seien. Sie unterscheiden sich in Verhalten und Gestalt von den sich fortpflanzenden Bienenmännchen (Drohnen) und Bienenweibchen (Königinnen), können aber diese abweichenden Eigenschaften, da sie ja steril sind, gar nicht weitergeben. Aber sie tun es offenbar doch – nur wie tun sie es?

Darwin hat für diese Überlegungen eine kluge und ihn beruhigende Lösung gefunden. Man kann gut begründet vermuten, dass er von der »ganzheitlichen« Auffassung, insbesondere der deutschen Imker, von einer Bienenkolonie als einem zusammenhängenden Wesen (»ein Säugetier mit vielen Körpern«) wusste. Die oben geschilderten konzeptionellen Probleme werden deutlich kleiner, wenn man nun davon ausgeht, dass die Selektion ja nicht nur an Individuen, sondern auch an der ganzen Kolonie angreifen könnte. So gesehen wären es laut Darwin die kompletten Kolonien, die untereinander um die größte Anzahl an Nachkommen konkurrieren und nicht jede Einzelbiene für sich. Die Kolonie wäre die Einheit der Evolution und nicht die Einzelbiene. Die moderne Evolutionsbiologie bezeichnet die Vorstellung einer Evolution von Kolonien als geschlossene Einheiten als Gruppenselektion.

Es blieb auch nach Darwin eine Unsicherheit darüber, wieso ausgerechnet bei den Bienen und deren Verwandten wie Hummeln, Wespen und Ameisen die einzelnen Arbeiterinnen darauf verzichten, innerhalb der Kolonie über die Anzahl eigener Nachkommen mit anderen Einzeltieren der Kolonie zu konkurrieren. Der Verzicht auf eigene Nachkommen erscheint doch geradezu als eine totale Aufgabe der eigenen Interessen. Überraschenderweise ist es gerade der Verzicht auf eigene Nachkommen, der bei den Honigbienen eine erfolgreiche Maßnahme zur Verbreitung der eigenen Gene darstellt. Im Verständnis dieser seltsamen Situation kommt man weiter, wenn man sich in eine sehr elegante Betrachtungsweise vertieft, die vor allem durch die beiden britischen Biologen John Maynard Smith (1920–2004) und William D. Hamilton (1936–2000) populär gemacht worden ist. Die Kernüberlegung dazu lautet wie folgt: Einander entsprechende Gene, die an gleicher Stelle auf den beiden homologen Chromosomen der diploiden Organismen sitzen, heißen Allele. Diese können in unterschiedlicher Form auftreten und bilden die Basis für die Variabilität der Gene. Allele werden nicht nur direkt von Eltern zu Kindern weitergegeben, sondern

Kopien von ihnen existieren auch in leiblichen Geschwistern und deren Kindern, in Cousins und Cousinen, in Onkeln und Tanten, in der gesamten leiblichen Verwandtschaft. Also könnte ein Verhalten, das Verwandte in der Erzeugung und Aufzucht von Jungen unterstützt, durchaus auch für den Unterstützer vorteilhaft sein, selbst wenn er dabei auf eigene Nachkommen verzichtet. Ein solcher Verzicht ist dann nicht von Nachteil, wenn seine Allele entsprechend häufig in der Verwandtschaft auftreten. Diese so genannte Verwandtenselektion hat eindeutig Konsequenzen insbesondere für Überlegungen zur Entstehung von kooperativem oder im Extrem altruistischem Verhalten der Tiere. Sie bietet auch die Erklärungsbasis für das Überschreiten einer Schwelle vom »Einzelkämpfer« zum sozialen Wesen in der Evolution der Honigbienen. Diejenigen Allele, die sich im verzweigten Verwandtennetz am erfolgreichsten ausbreiten, wirken »egoistisch« auf Kosten der unterlegenen Allele. Die Sichtweise, dass sich Allele »egoistisch verhalten«, ist in dem sehr einflussreichen Buch »Das egoistische Gen« des britischen Biologen Richard Dawkins (geb. 1941) plakativ dargestellt: Diejenigen Allele, die die meisten Kopien von sich anfertigen können, sind erfolgreich auf Kosten der Verlierer. Sie erscheinen einem Betrachter wie sich egoistisch verhaltende Einheiten.^[2]

Betrachten wir unter dem Gesichtspunkt der »Verbreitungssucht der Allele« die Honigbienen. Honigbienen zeigen wie alle Hautflügler, auch die nicht-staatenbildenden, einen ungewöhnlichen Mechanismus zur Festlegung des Geschlechts eines sich entwickelnden Organismus. Bienen aus unbefruchteten Eiern haben einen einzigen Chromosomensatz, sind also haploid. Bienen aus befruchteten Eiern haben zwei Chromosomensätze, sind also diploid. Honigbienen besitzen ein einziges Gen zur Geschlechtsbestimmung, das in unterschiedlichen Allelen auftreten kann. Hat eine Biene dieses Gen nur einmal, wie es für die haploiden Drohnen gilt, so entwickelt sich – gleichgültig welches Allel vorliegt – ein männlicher Organismus. Ist eine diploide Biene für dieses Gen heterozygot, entwickelt sich ein Weibchen. Ist ein diploides Bienen-Gen durch zufällige Genkombination für das Sex-Gen homozygot, was nicht mal selten geschehen kann, entsteht ein diploider Drohn, der von den Arbeiterinnen meistens bereits als Larve getötet wird.

Diese Art der Geschlechtsbestimmung über die Anzahl der Sätze an Chromosomen hat seltsame Konsequenzen: Männchen haben keine Väter, da sie aus unbefruchteten Eiern entstehen. Demnach haben

Männchen keine Söhne, sondern höchstens Enkelsöhne. Bekommen ein Vater und eine Mutter Töchter, so haben diese Töchter untereinander mehr Allele gemeinsam, als sie mit ihren eigenen Kindern hätten. Honigbienschwestern besitzen im statistischen Mittel dreiviertel ihrer Allele gemeinsam. In der Realität schwanken diese Werte zwischen 50 % gemeinsamer Allele (nur die väterlich vererbten Allele sind gleich) und 100 % (väterlich und mütterlich vererbte Allele sind gleich). Zur Verbreitung der eigenen Gene ist es für ein Bienenweibchen also sinnvoll, auf eigene Kinder zu verzichten und stattdessen der Mutter zu helfen, so viele Schwestern wie möglich auf die Welt zu bringen. Die sterilen Arbeiterinnen sollten sich untereinander zur Verbreitung ihrer Allele kooperativ unterstützen. Und es hat ja den Anschein, dass dies in Bienenkolonien der Fall ist.

Weitere Detailkenntnisse der Realität im Leben der Honigbienen bringen jedoch diese glatte Überlegung in Nöte. Eine Königin paart sich auf dem Hochzeitsflug im Mittel mit zwölf Drohnen. Deren Spermien befruchten die Eier der Königin, die sich zu Weibchen entwickeln. Die Arbeiterinnen eines Bienenvolkes haben demnach alle dieselbe Mutter, aber viele Väter. Alle Arbeiterinnen, die mit dem Sperma desselben Drohns gezeugt worden sind, sind Schwestern. Zu den Weibchen mit anderen Vätern sind sie Halbschwestern. Und da man ja mit Schwestern mehr gemeinsame Allele besitzt als mit Halbschwestern, sollte man seine Halbschwestern auch weniger unterstützen als seine Schwestern. Es ist demnach ein komplexes Spiel von Kooperation innerhalb der Schwestergruppen und Konflikt zwischen den unterschiedlichen Schwestergruppen zu erwarten. In Dressurexperimenten lässt sich zeigen, dass die Bienen am Geruch der dünnen Wachsschicht, die als Verdunstungsschutz die Körperoberfläche jedes Insekts versiegelt, Vollschwestern von Halbschwestern unterscheiden sollten.^[4]

Die Realität der heute lebenden Superorganismen Bienenkolonie »bringt Sand in das Getriebe der Theorie«, wenn man alleine die Verwandtschaftsverhältnisse als Erklärung für die aktuelle Bienenbiologie heranziehen möchte. Nur wenn eine Mutter und ein Vater alle Bienen eines Volkes zeugen, trifft Hamiltons quantitative Überlegung zu. Da aber in einem Bienenvolk viele Väter ihre Spuren hinterlassen, trifft das für Bienenvölker, wie wir sie heute vorfinden, nicht mehr zu. Haben wir hier für die Anwendung der Theorie der Verwandtenselektion auf die heutigen Honigbienen also eine Situation getreu der Feststellung, die T.H. Huxley (1825-1895) vor langer Zeit einmal getroffen hat?

»*The great tragedy of science is the slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact*«? So dramatisch verhält es sich hier nicht. »Hamilton« war notwendig, um im Verlauf der Evolution die Bienen auf den Weg eines Superorganismus zu bringen. Die Existenz haploider Männchen war das Substrat, auf dem sich die Hautflügler-Superorganismen entwickeln konnten. So ist es gut vorstellbar, dass sich Schwestern bei der Nestgründung und der Jungenaufzucht gegenseitig geholfen haben, so wie wir es bei einigen unserer heutigen Wespen finden.

Aber wieso fliegt eine Honigbienenkolonie nicht auseinander? Die genetische Situation müsste Zentrifugalkräfte erzeugen, die den Superorganismus sprengen würden. Was hält die Honigbienen noch heute auf diesem Niveau, wenn die Verwandtenselektion keine eindeutige Basis mehr hat?

Was hält den Bienen zusammen?

Verwandtenselektion hat offenbar zur Bildung von Superorganismen geführt. Die Mehrfachpaarung der Bienenköniginnen passt nicht in dieses Erklärungsschema. Worin besteht also der Vorteil, wenn die Arbeiterinnen einer Honigbienenkolonie verschiedene Väter haben?

Da es offenbar nicht eine enge genetische Verwandtschaft unter allen Mitgliedern der Kolonie ist, die einen »Rückfall« in das Leben von Einzelkämpfern verhindert, müssen andere Aspekte in die Blickrichtung der Aufmerksamkeit rücken, die ein Auseinanderbrechen des Superorganismus verhindern.

In seinem Buch »*The wisdom of the body*« prägte W.B. Cannon 1939 für geregelte Körperparameter den Begriff der Homöostase. Das Teilgebiet der Biologie, das die Grundlagen derartig geregelter Vorgänge in Organismen untersucht, ist die Physiologie. Übertragen auf die Analyse geregelter Zustände in einer Bienenkolonie untersucht die Soziophysiologie, ob und welche Regelgrößen in einer Bienenkolonie homöostatisch eingestellt werden (soziale Homöostase; Lit. [3,10]), wie dies von den Bienen im Detail bewerkstelligt wird und wozu das Ganze dienen soll. In einem funktionierenden Organismus sind Lebensfunktionen im Gleichgewicht. Da äußere und innere Faktoren dieses Gleichgewicht stören können, laufen Prozesse ab, mit denen das Gleichgewicht aktiv neu eingestellt werden kann. Diese Prozesse sollten Folgendes leisten: Fallen Werte unter eine bestimmte Größe, werden

sie aktiv erhöht, sind sie zu hoch, werden sie herabgesetzt. Derartige Regelvorgänge finden über Rückkopplungen statt. Rückkopplungen stellen Verbindungen zwischen verschiedenen Teilen des Systems und mit der Außenwelt her und sorgen für die Aufrechterhaltung der Homöostase. Homöostase in einem biologisch-organismischen System, wie einer Bienenkolonie, ist die Selbstregulation eines Gleichgewichtszustandes. Der Begriff Gleichgewicht mag Ruhe und Stillstand suggerieren. Die geregelten Zustände in einem Bienenvolk sind jedoch alles andere als »eingefroren«. Die Zielgrößen ändern sich laufend und sind nur durch hohe Daueraktivität des Volkes zu erreichen. Man könnte den beiden chilenischen Vordenkern Francisco Varela (1946-2001) und Humberto Maturana (geb. 1928) folgen und bei solchen hochdynamischen Fällen eher von einer Homöodynamik als von einer Homöostase sprechen.

Die strukturellen Gegebenheiten eines geregelten biologischen Systems haben zwei Konsequenzen, die zu den Fundamenten der organismischen Biologie gehören:

1. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Es entstehen emergente Eigenschaften, die auf dem Niveau der Bausteine nicht vorhanden sind.
2. Das Ganze bestimmt umgekehrt das Verhalten seiner Teile.

Ein Superorganismus besitzt genau wie jeder solitäre Organismus eine »Superphysiologie« (ich benutze die Begriffe Hyperphysiologie oder Soziophysiologie), die aus den Eigenschaften und den Interaktionen der Koloniemitglieder hervorgeht. Es ist diese Soziophysiologie eines Superorganismus (Abb. 5-7), die als mächtige Klammer die Koloniemitglieder beisammenhält und deren Eigenschaften von der Selektion im Wettlauf der Superorganismen untereinander bewertet werden. Die Eigenschaften der gesamten Gruppe sind der Phänotyp, an dem die Selektion wirksam wird. Gehört ein Tier einer gut angepassten Gruppe an, ist es auf der Gewinnerseite. Solche Arbeitsbienen überleben und können Allele aus ihrem Erbgut vermehren – wenn auch nur indirekt durch ihre Mutter und ihre Brüder.

Eine wesentliche Ursache für den massiven genetischen Konflikt innerhalb einer Bienenkolonie ist die Mehrfachpaarung der Königin. Was also gewinnt der Superorganismus durch diese Mehrfachpaarungen der Königin, wenn er sich dadurch interne Konflikte einhandelt? Viele Väter bedeuten viele unterschiedliche Allele und das bedeutet



Abbildung 5: Die Abwehr von Krankheiten und Parasiten spielt sich im Superorganismus Bienenstaat auf allen Ebenen ab. Eine intakte soziale Homöostase hält das Bienenvolk gesund. Adaptive Verhaltensweisen, wie hier das Entfernen als krank erkannter Puppen, sind wichtiger Bestandteil der Nesthygiene. Foto: Helga R. Heilmann.

Arbeiterinnen mit entsprechend vielen unterschiedlichen Merkmalen. Solche Unterschiede zwischen den Bienen betreffen unter anderem die Empfindlichkeit gegenüber Umweltreizen. Manche Väter zeugen reizempfindliche, andere zeugen reizunempfindliche Arbeiterinnen. Die konkreten Folgen dieser großen Spannweite an Empfindlichkeiten betreffen die Intensität, mit der eine Kolonie gegen äußere oder innere Störungen vorgeht. Wird es im Brutnest zu kalt, beginnen bestimmte Tiere schon bei einem sehr geringen Temperaturabfall zu heizen. Eine



Abbildung 6: Die Errichtung der Waben, des größten »Organs« des »Säugetiers mit vielen Körpern« ist eine emergente Gemeinschaftsleistung des Superorganismus. Die Funktion der Bauketten, gebildet aus aneinanderhängenden Bienen, ist noch vollkommen unverstanden. Foto: Helga R. Heilmann.

andere Bienengruppe schließt sich erst an, wenn die Temperatur noch weiter abgefallen ist, wieder andere bei noch tieferen Temperaturen. Es ist leicht einzusehen, dass eine Kolonie als Ganzes auf diese abgestufte Weise immer optimal auf Störungen reagiert, da genau so viele Kräfte mobilisiert werden, wie es der Stärke der Störung angemessen ist. Ein breites Spektrum von hochempfindlichen bis sehr unempfindlichen Bienen führt automatisch immer zur richtigen Reaktion der Kolonie.

Aber es sind nicht nur die gemeinschaftlich eingestellten klimatischen Lebensbedingungen im Nest, für die viele Väterlinien innerhalb einer Kolonie von Vorteil sind. Der Vorteil von Vielvaterschaft im Bienenstock und damit eine bunte Zusammensetzung der Eigenschaften ihrer Mitglieder betreffen jeden Aspekt im Leben eines Bienenvolkes, der bisher daraufhin untersucht worden ist.^[5] So steigt die Fähigkeit, sich als Kolonie gegen Pathogene zu wehren und gesund zu halten mit der Anzahl der Vaterlinien im Volk.^[7]



Abbildung 7: Moderne Technologie erlaubt ein tiefes Eindringen in den Superorganismus Bienenstaat. Mikrochips, die den Bienen bei ihrer Geburt auf den Rücken geklebt werden, ermöglichen die Identifizierung der individuellen Bienen und deren lückenlose Verhaltensregistrierung. Foto: Helga R. Heilmann.

Vorläufiges Fazit

Die Entwicklung und Verbreitung des Lebens auf unserer Erde spielt sich seit den ersten Anfängen vor geschätzten viereinhalb Milliarden Jahren nach unveränderten Prinzipien ab. Sucht man nach Phänomenen, die mit der Evolution von der anfänglich nackten, sich selbst kopierenden Erbsubstanz bis zu heutigen Lebensformen einhergehen, so fällt auf:

- Es entstehen mit der Zeit immer komplexere Strukturen.
- Die entstehenden Strukturen leisten mehr als die Summe ihrer Teile.
- Die Strukturen können das Verhalten ihrer Teile bestimmen.
- Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile, so hat schon Aristoteles formuliert.



Abbildung 8: HOBOS-Poster, erstellt von S. Golla und K. Vonend, HOBOS-Team.

Es bleibt festzustellen, dass die Säugetiere und die koloniebildenden Honigbienen unabhängig voneinander eine Reihe von Erfindungen gemacht haben, die sie in ihrer Summe zu hochkomplexen Systemen machen. Auf diese Weise konnten sie sich eine Unabhängigkeit und Überlegenheit schaffen, die ihresgleichen sucht.

HOBOS – ein Fenster in den Bienenstaat

Die *HoneyBee Online Studies* HOBOS der Universität Würzburg eröffnen allen Interessierten die Möglichkeit, anhand eines »High-Tech-Bienenvolkes« einen Blick in einen echten Bienenstock zu werfen (Abb. 8). Sensoren melden kontinuierlich aus dem Bienenstock und dessen Umgebung eine Vielzahl von Daten, die im naturwissenschaftlichen Unterricht fächer-, klassen- und schulartübergreifend ausgewertet werden können. Unter www.hobos.de sind außerdem Live-Videos aus dem Bienenstock und dessen Umgebung abrufbar. Alle Daten und Videos werden gespeichert und stehen den Nutzern jederzeit zur Verfügung. Für eine Reihe von Schulfächern bietet HOBOS konkrete Unterrichtsvorschläge an. So weckt HOBOS die Neugier auf Natur, Wissenschaft und Forschung.

Literatur

- [1] S. Camazine, J.L. Deneubourg, N.R. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, E. Bonabeau: Self-organization in biological systems, Princeton and Oxford (Princeton University Press) 2001.
- [2] R. Dawkins: Das egoistische Gen, Heidelberg (Spektrum) 2006.
- [3] A.E. Emerson: Regenerative behaviour and social homeostasis in termites, *Ecology* 1956, 37, S. 248-258.
- [4] B. Fröhlich, M. Riederer, J. Tautz: Honeybees discriminate cuticular waxes based on esters and polar components, *Apidologie* 2001, 32, S. 265-274.
- [5] S. Fuchs: Selection for behavioral diversity within honeybee colonies. In: C.K. Hemelrijk (Hrsg.): Self-Organization and Evolution of Social Behaviour. AI Lab, University of Zürich 2002.
- [6] F. Gerstung: Das Grundgesetz der Brut- und Volksentwicklung des Biens, Bremen 1890.
- [7] H.R. Mattila, T.D. Seeley: Genetic Diversity in Honey Bee Colonies Enhances Productivity and Fitness, *Science* 2007, 317, S. 362-364.
- [8] J. Tautz: Phänomen Honigbiene, Heidelberg (Spektrum) 2007. Alle Abbildungen sind diesem Buch entnommen.
- [9] W.M. Wheeler: The Ant Colony as an Organism, *Journal of Morphology* 1911, 22, S. 307-325.
- [10] E.O. Wilson: The insect societies, Cambridge Mass. (Harvard university press) 1971.

Stefan Rahmstorf

Die Klimakrise¹

Es war der 10. Juni 1859, ein halbes Jahr bevor Charles Darwin seine Schrift *Origin of Species* veröffentlichte: In den holzgetäfelten Räumen der *Royal Society* in London demonstrierte der britische Physiker John Tyndall eine Reihe bemerkenswerter Experimente. Die denkwürdige Versammlung wurde von Prinz Albert geleitet. Aber weder er noch Tyndall dürften geahnt haben, wie sehr die Ergebnisse dieser Experimente die Welt 150 Jahre später in Atem halten würden.

Im Dezember 2009 trafen sich über 40.000 Menschen aus aller Welt, darunter rund 120 Staatschefs, in Kopenhagen – und scheiterten vorerst bei dem Versuch, die entscheidende Konsequenz aus Tyndalls Messungen zu ziehen und den Ausstoß klimaschädlicher Gase wirksam zu begrenzen.

Der »Treibhauseffekt« ist seit 1824 bekannt

Doch die Geschichte beginnt bereits vor Tyndall mit dem französischen Genie Joseph Fourier. Als Waise, der von Mönchen erzogen wurde, hatte er bereits im Alter von 18 Jahren den Professorentitel inne. Er wurde Napoleons Gouverneur in Ägypten, widmete sich später aber wieder ganz der Wissenschaft. Im Jahr 1824 entdeckte er, weshalb unsere Welt so warm ist – dutzende Grade wärmer, als eine einfache Berechnung der Energiebilanz nahelegt. Die Sonne bringt die Wärme, und die Erde strahlt sie, unsichtbar für unser Auge, in alle Richtungen ins All hinein. Aber die Zahlen summierten sich nicht zu Null, denn sonst hätte sich die Erde dramatisch abkühlen müssen. Fourier verstand, weshalb das nicht geschieht: Gase in unserer Atmosphäre fangen die abgestrahlte Wärme ab. Er nannte diese Entdeckung *l'effet de serre*, den Treibhauseffekt. Ohne ihn wäre unser Planet kalt und unbelebt. Es war

1 Zuerst veröffentlicht unter dem Titel: Klimawandel – Aus dem Physiklabor auf die internationale Agenda. In: Senckenberg – Natur, Forschung, Museum 141(1/2) 2011, S. 6–13.

Tyndall, der diese Ideen dann durch Laborversuche untermauerte. Er bewies, dass einige Gase Strahlungswärme absorbieren – genau die Wellenlängen, die die Erde abstrahlt.

Eines davon war Kohlenstoffdioxid (CO_2). Tyndall beschrieb 1859 den Treibhauseffekt in unübertroffener Klarheit: »*The atmosphere admits of the entrance of solar heat, but checks its exit; and the result is a tendency to accumulate heat at the surface of the planet.*« Die Atmosphäre lässt Sonnenwärme hinein, aber behindert ihren Abfluss; das Ergebnis ist die Tendenz, Wärme an der Oberfläche des Planeten anzusammeln.

Im Jahr 1896 rechnete der schwedische Chemiker Svante Arrhenius, der einige Jahre später den Nobelpreis erhielt, zum ersten Mal aus, welche globale Erwärmung eine Verdoppelung der CO_2 -Menge in der Luft verursachen würde. Er kam auf 4-6° C, etwas mehr also als die 2-4° C, die zahlreiche moderne Studien übereinstimmend ergeben. Für eine ganz korrekte Berechnung fehlten Arrhenius damals noch einige »Zutaten«. Arrhenius war nicht besorgt über eine Erwärmung, im Gegenteil: Er hoffte, vor allem für die kälteren Teile der Erde, auf »gleichmäßigere und bessere klimatische Verhältnisse« und schlug sogar vor, Kohleflöze anzuzünden, damit es möglichst bald wärmer werde.

Globale Messreihen bringen den Durchbruch

Aber all das blieb akademische Spekulation und nackte Theorie. Niemand verfügte über die nötigen Messungen, um einen CO_2 -Anstieg in der Luft überhaupt nachzuweisen. Das änderte sich erst in den späten 1950er Jahren, als Charles Keeling mit bis dahin unerreichter Präzision CO_2 -Messreihen in der Antarktis und auf dem Mauna Loa in Hawaii begann – weit weg von allen CO_2 -Quellen. Schon 1960 gelang ihm der Nachweis, dass die CO_2 -Konzentration in der freien Atmosphäre tatsächlich steigt.

Nur fünf Jahre später erschien der erste von vielen Expertenberichten für den damaligen US-Präsidenten Lyndon B. Johnson, in dem die Wissenschaftler vor der drohenden globalen Erwärmung warnten: »Bis zum Jahr 2000 wird die Zunahme der CO_2 -Menge rund 25 Prozent betragen. Das könnte ausreichen, um messbare, vielleicht deutliche Klimaänderungen zu verursachen.« Einer spezifischeren Prognose in der führenden Fachzeitschrift *Nature* im Jahr 1972 zufolge, sollten die

Temperaturen durch den Treibhauseffekt bis zum Jahr 2000 um $0,5^{\circ}\text{C}$ steigen. Auch *Science* publizierte 1975 eine vergleichbare Rechnung. Diese Voraussagen sind umso bemerkenswerter, da sie zu einer Zeit gemacht wurden, als die Temperaturen jahrzehntelang stagnierten. Aber die physikalischen Zusammenhänge waren ja bekannt. 1979 läutete die *US National Academy of Sciences* in einem Bericht als erste große Wissenschaftsorganisation die Alarmglocken wegen der drohenden Erwärmung.

Mitte der 1980er Jahre begannen die Messdaten der weltweiten Wetterstationen, den Erwärmungstrend zu belegen. Im Jahr 1988 wurde das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) gegründet, und im Jahr 1992 unterzeichneten die Staatsführer der Welt in Rio de Janeiro ein historisches Abkommen, die Klimarahmenkonvention. Ihr Ziel: »die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau, das eine gefährliche menschliche Störung des Klimasystems verhindert.«

Anfang der 1990er Jahre waren die globalen Temperaturen im Vergleich mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts bereits um $0,5^{\circ}\text{C}$ gestiegen, seit dem Erdgipfel von Rio sind nochmals $0,3^{\circ}\text{C}$ hinzugekommen. Und die Temperaturen steigen weiter: Daten der NASA zufolge war das meteorologische Jahr 2010 global das wärmste seit den ersten Aufzeichnungen im Jahr 1880, und das, obwohl die Sonne »schwächelt«: Ihre Leuchtkraft verharrt nämlich seit einigen Jahren auf dem tiefsten Stand seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970er Jahren.

Konsens zur globalen Erwärmung

Wesentliche Kernaussagen der Klimaforschung wurden in den letzten Jahrzehnten so gut bestätigt, dass sie heute von Klimaforschern allgemein als Tatsachen akzeptiert sind. Dazu gehören:

1. Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist seit ca. 1850 stark angestiegen, von dem für Warmzeiten seit mindestens 700.000 Jahren typischen Wert von 280 ppm auf inzwischen über 380 ppm.
2. Für diesen Anstieg ist der Mensch verantwortlich, in erster Linie durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, in zweiter Linie durch die Abholzung von Wäldern.
3. CO_2 ist ein klimawirksames Gas, das den Strahlungshaushalt der Erde verändert: Ein Anstieg der Konzentration führt zu einer Er-

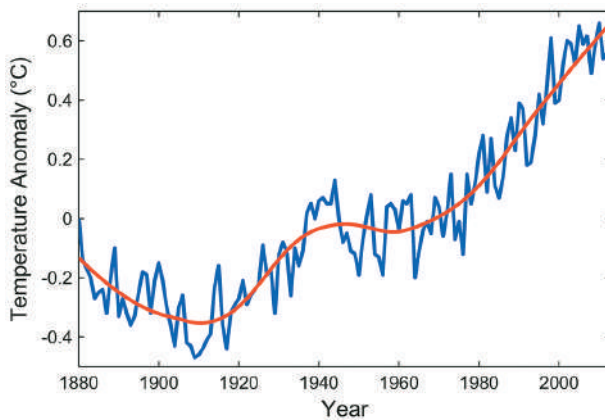


Abbildung 1: Globale Temperaturen bis einschließlich 2012 nach dem Datensatz der NASA, *Goddard Institute for Space Studies* (GISS). Punkte zeigen die einzelnen Jahreswerte, die Kurve einen nicht-linearen Trend über 15 Jahre geglättet. Die Zahlenwerte sind Abweichungen vom Mittelwert 1880–1920.

- wärmung der oberflächennahen Temperaturen (Abb. 1). Verdoppelt sich der CO_2 -Gehalt der Luft, steigt die globale Mitteltemperatur um 2–4 °C an (der wahrscheinlichste Wert beträgt ca. 3 °C).
4. Seit 1900 stieg die globale Temperatur um rund 0,8 °C. Die Temperaturen der abgelaufenen zehn Jahre waren global die wärmsten seit Beginn der Messungen im 19. Jahrhundert und wahrscheinlich seit mindestens einem Jahrtausend.
 5. Der überwiegende Teil dieser Erwärmung ist auf die gestiegene Konzentration von CO_2 und anderen anthropogenen Gasen zurückzuführen.

Diese Erkenntnisse beruhen auf jahrzehntelanger Forschungsarbeit und tausenden von Studien. Es ist praktisch undenkbar, dass sie durch einige neue Resultate auf einmal umgestoßen werden könnten. Der außerordentliche Konsens darüber zeigt sich in den Stellungnahmen zahlloser internationaler und nationaler Fachgremien, die sich ausführlich und kritisch mit der wissenschaftlichen Beweislage befasst haben. Neben den bekannten Berichten des IPCC gibt es unter anderem Stellungnahmen der wissenschaftlichen Akademien aller G8-Staaten, der *American Geophysical Union* (AGU – die weltweit größte Organisation

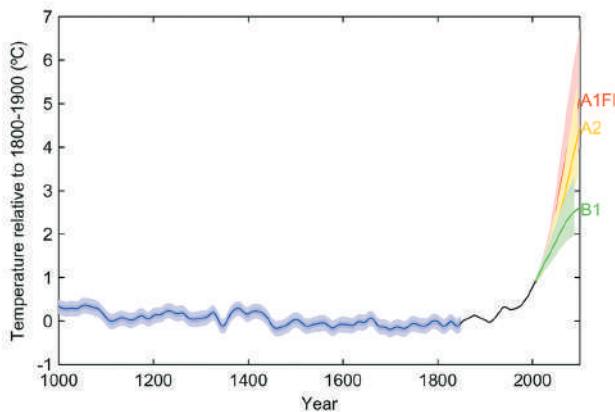


Abbildung 2: Szenarien des IPCC 2007 zum Anstieg der globalen Temperatur im 21. Jahrhundert. Gezeigt sind die drei Emissionsszenarien B1, A2 und A1FI mit zugehörigen Unsicherheitsbereichen. Zum Vergleich die Temperaturen seit dem Mittelalter aus Proxydaten (Mann et al. 2008, blau mit Fehlermargen) sowie die Messdaten ab 1860 (schwarz).

der Geowissenschaftler), der *World Meteorological Organisation* (WMO), der meteorologischen Organisationen vieler Länder (u.a. eine gemeinsame Erklärung der deutschen, österreichischen und schweizerischen meteorologischen Gesellschaften) oder des wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung (WBGU). Alle diese Gremien sind in den Kernaussagen immer wieder zu demselben Ergebnis gelangt.

Aus Punkt 1 bis 3 folgt, dass eine weitere Erhöhung der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre zu einem weiteren Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur führen muss. Je nach Höhe der künftigen Emissionen wird sich (ohne Klimaschutz) der Anstieg bis 2100 im Bereich von 2-7 °C über die vorindustrielle Temperatur bewegen (Abb. 2).

Zum Vergleich: Die letzte große globale Erwärmung fand Ende der letzten Eiszeit statt (vor ungefähr 15.000 Jahren). Über einen Zeitraum von 5.000 Jahren stieg die globale Temperatur um etwa 5 °C. Eine unbegrenzte anthropogene Erwärmung könnte schon in einem Bruchteil dieses Zeitraums ähnliche Ausmaße erreichen – und sie beginnt von einem bereits warmen Klima.

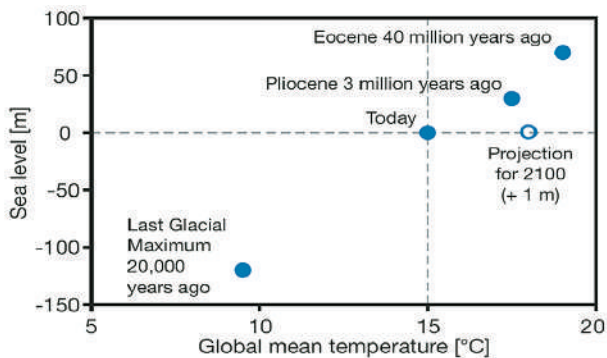


Abbildung 3: Durchschnittliche globale Temperatur und durchschnittlicher globaler Meeresspiegel zu unterschiedlichen Zeiten in der Erdgeschichte. Langfristig ist durch die anthropogene Erwärmung wahrscheinlich mit einem wesentlich höheren Meeresspiegelanstieg um mehrere Meter zu rechnen. Quelle: WBGU 2006 nach Archer 2006.

Folgen des Klimawandels

Durch die globale Erwärmung ergeben sich eine Reihe gravierender Risiken, von denen im Folgenden einige Beispiele aufgeführt sind. Die genauen Folgen eines derart einschneidenden Klimawandels lassen sich nicht leicht voraussagen, somit sind auch Überraschungen möglich.

1. Anstieg des Meeresspiegels und Abschmelzen der Eisschilde

Im 20. Jahrhundert stieg der globale Meeresspiegel um 15–20 cm. Der globale Meeresspiegel steigt seit 1990 mit 3,4 cm pro Jahrzehnt 80 % schneller als es die Szenarien des IPCC voraussagten. Der voraussichtliche Anstieg bis 2100 wird wahrscheinlich rund einen Meter betragen, im Extremfall bis zu zwei. Doch auch wenn die Erwärmung bei 3 °C gestoppt wird, steigt der Meeresspiegel in einer verzögerten Reaktion in den darauf folgenden Jahrhunderten wahrscheinlich um weitere Meter an (Abb. 3). Dies gefährdet Städte in Küstennähe und tief liegende Inseln. Was heutzutage noch als Jahrhundertflut in New York gilt (mit verheerenden Schäden und überfluteten U-Bahnen), würde statistisch gesehen alle drei Jahre auftreten, falls der Meeresspiegel um nur einen Meter ansteige.

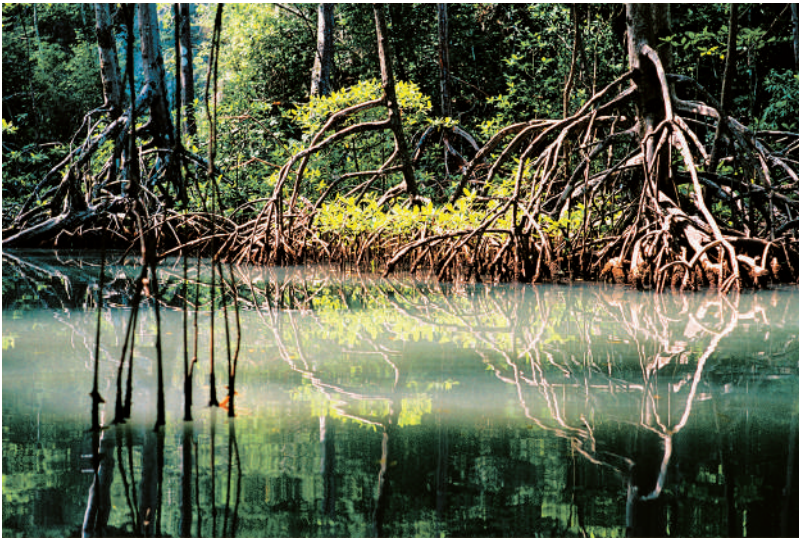


Abbildung 4: Die Ökosysteme der Küsten wie Mangrovenwälder, Strände, die von Meeresschildkröten zur Eiablage aufgesucht werden, oder küstennahe Feuchtgebiete sind wie die Korallenriffe selbst vom Anstieg des Meeresspiegels bedroht. Foto: Stefan Rahmstorf.

2. Verlust von Ökosystemen und Tier- und Pflanzenarten

Die globale Temperatur würde Werte erreichen, die es in dieser Höhe seit Millionen von Jahren nicht gegeben hat. Die Temperatur würde so schnell steigen, dass viele Tier- und Pflanzenarten sich nicht daran anpassen können. Ein erheblicher Teil der Tier- und Pflanzenarten – einige Studien gehen von bis zu einem Drittel aus – könnten bereits im Jahre 2050 vom Aussterben bedroht sein (Abb. 4). Das Leben in den Weltmeeren wird nicht nur vom Klimawandel bedroht, sondern vom nicht minder ernst zu nehmenden Problem einer zunehmenden Versauerung, die ebenfalls durch unsere CO₂-Emissionen verursacht wird.

3. Gefahr von Extremereignissen

In einem wärmeren Klima steigt die Gefahr von Überschwemmungen (Abb. 5), da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann (pro Grad Erwärmung 7 % mehr). Es wird in einigen Regionen wahrscheinlich



Abbildung 5: In einem wärmeren Klima steigt die Gefahr von Überschwemmungen, da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen und abgeben kann. Foto: Stefan Rahmstorf.

mehr Dürreperioden und Waldbrände geben, so wie es derzeit bereits im Mittelmeerraum oder im südlichen Afrika der Fall ist. Es ist zu erwarten, dass Hurrikane größere Zerstörungen anrichten. Sowohl Modelle als auch Daten zeigen einen Anstieg der Stärke (nicht aber der Häufigkeit) von Hurrikanen aufgrund höherer Meeresoberflächentemperaturen (Abb. 6). Im abgelaufenen Jahrzehnt gab es eine Häufung nie dagewesener Extreme, zuletzt z.B. die Hitzewelle in Russland und Überflutungen in Pakistan 2010 sowie Extremniederschläge in Australien im Januar 2011.

4. Gefahr für Wasserversorgung und Nahrungsangebot

Während die globale landwirtschaftliche Produktion in wärmeren Klimaverhältnissen nicht notwendigerweise zurückgehen muss, wird es in ärmeren und warmen Ländern aufgrund von Wasserknappheit und

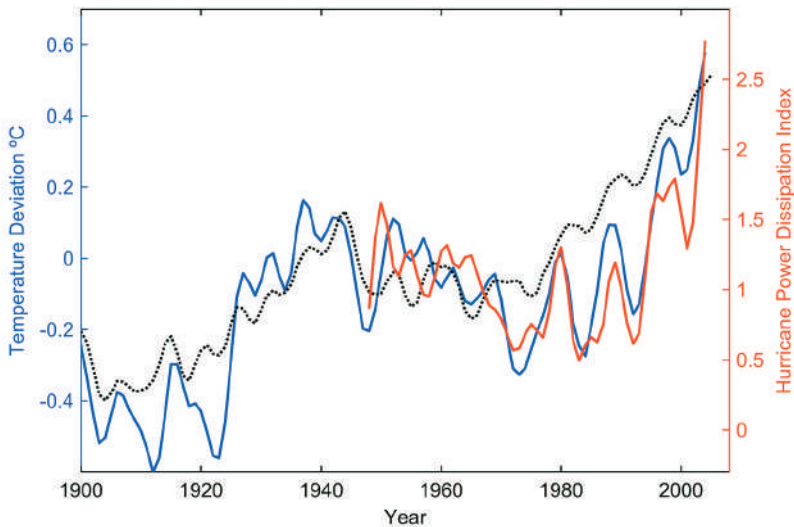


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Intensität von tropischen Stürmen (*Power Dissipation Index* – PDI, rot) und durchschnittliche Meeresoberflächentemperatur im tropischen Atlantik von August bis Oktober (blau). Zum Vergleich wird die Entwicklung der global gemittelten Temperatur gezeigt (gestrichelte graue Linie). Quelle: WBGU 2006 nach Emanuel 2005.

Wetterextremen zu Ernteeinbußen kommen. Die Wasserversorgung größerer Städte wie Lima ist gefährdet, wenn Berggletscher verschwunden sind.

Wenn das Eis schmilzt ...

Wer vom Weltall aus auf die Erde blickt, kann es deutlich sehen: Die Eisdecke auf dem arktischen Ozean schrumpft (Abb. 7). In den letzten Jahren ging sie im Sommer auf rund fünf Millionen Quadratkilometer zurück – kaum mehr als halb so groß wie noch in den 1970er Jahren. Im Jahr 2007 war erstmals seit Menschengedenken die Nordwestpassage eisfrei; ein Jahr später sogar die Nordwest- und die Nordostpassage. Letztere wurde von Frachtschiffen einer Bremer Reederei im Sommer 2009 zum ersten Mal durchfahren.

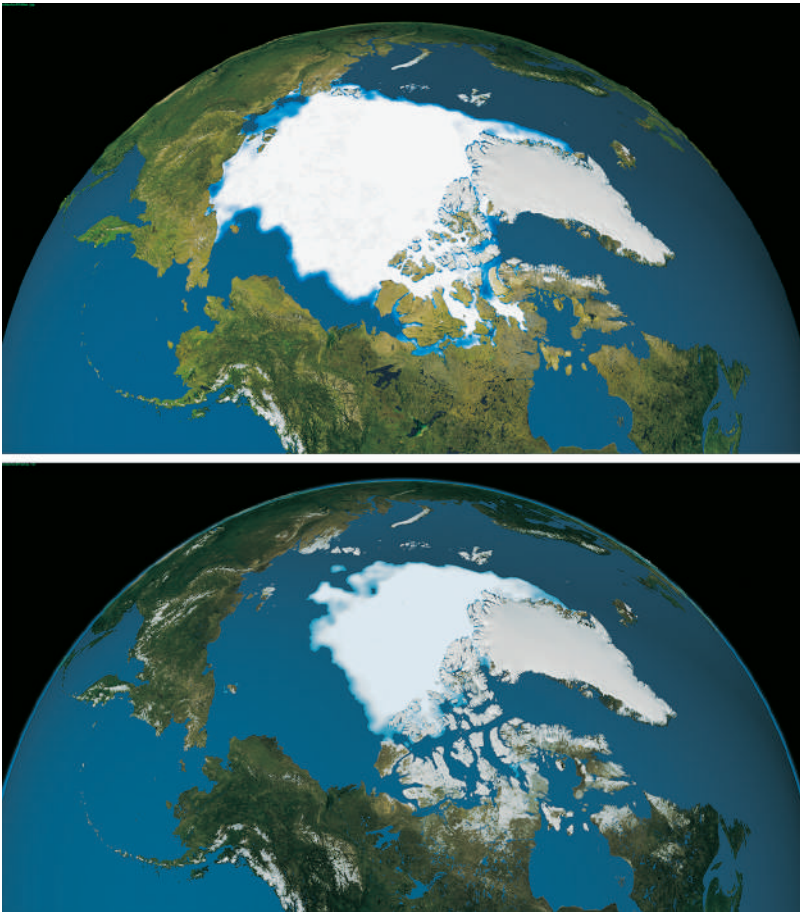


Abbildung 7: Meereisdecke auf dem arktischen Ozean. Oben: im September 1979 (dem Beginn der Satellitenmessungen). Unten: im September 2007 (dem bisherigen Tiefpunkt). Der Trend zeigt eine Abnahme der Eisausdehnung um 40 % seit den 1970er Jahren, gleichzeitig hat die Dicke abgenommen. Im Dezember 2010 wurde das bisherige Rekordminimum für den Monat Dezember gemessen. Quelle: NASA.

Der globale Meeresspiegel steigt immer schneller an: um 17 Zentimeter im 20. Jahrhundert, und seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1993 schon mit der doppelten Rate, nämlich um 3,4 cm pro Jahrzehnt. Die beiden großen Kontinentaleismassen in Grönland und der Antarktis tragen dazu nicht unerheblich bei: Im Zeitraum 2003 bis 2008 waren ihre zunehmenden Zerfallserscheinungen für 40 Prozent des gemessenen Meeresspiegelanstiegs verantwortlich.

Die Klimageschichte warnt uns. Auf Veränderungen seiner Strahlungsbilanz hat der Planet stets sehr empfindlich reagiert, man denke nur an die großen Eiszeiten. Wir nutzen solche erdgeschichtlichen Daten in der Forschung, um die »Klimasensitivität« zu bestimmen, das zentrale Maß für die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber Störungen. Alles spricht dafür, dass der Planet auch dieses Mal heftig reagieren wird, wo der Mensch den wärmenden Treibhauseffekt verstärkt. Und auch die Folgen von scheinbar moderaten Temperaturänderungen waren massiv und tiefgreifend. Der Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren war im globalen Mittel nur 4 bis 7° C kälter als unser gegenwärtiges Klima, aber der Planet war ein anderer. Die Ökosysteme auf den Kontinenten waren völlig andere, der Meeresspiegel um 120 Meter niedriger. Am Ende dieser Eiszeit verlor die Erde durch die Erwärmung den größten Teil der damaligen Eismassen (Abb. 8). Als die große Schmelze vor rund 5.000 Jahren zu Ende ging, war noch ein Drittel des Eises übrig. Wie viel davon wird wohl abschmelzen, wenn wir die Erde um weitere drei, vier oder gar sieben Grad aufheizen? Der neue Schmelzprozess hat bereits begonnen.

Klimaschutz noch in den Kinderschuhen

In den 18 Jahren seit dem Erdgipfel in Rio sind kaum konkrete Erfolge erzielt worden. Im Jahr 2008 lag der Ausstoß von Treibhausgasen 40 Prozent über dem Wert von 1990. Warum ist es so schwer, diesen Trend zu brechen? Kohle, Erdöl und Erdgas haben in den vergangenen Jahrhunderten die industrielle Revolution angefangen und befeuert und Teilen der Welt großen materiellen Wohlstand gebracht: Autos, Flugzeuge, Computer, Handys – Joseph Fourier oder John Tyndall würden aus dem Staunen nicht herauskommen, könnten sie die Welt von heute besuchen. Wir waren clever und höchst erfolgreich. Nun müssen wir unsere Energie anders gewinnen. Wir haben keine andere Wahl, wollen



Abbildung 8: Oben: Zeuge der letzten Eiszeit: Entlang des *Whale Stream*-Tals in Neuseeland zieht sich die Lateralmoräne eines früheren Gletschers, auf ihr sind die Hubschrauber geparkt. Unten: Der *Mueller Glacier* (im Vordergrund, schuttbedeckt) am Mount Hook, Neuseeland, schrumpft schnell wie weltweit die meisten Gletscher. Die Moräne zeigt seine Ausdehnung im späten 19. Jahrhundert an. Im Hintergrund *Lake Pukaki*, ein eiszeitlicher See. Fotos: Stefan Rahmstorf.

wir unseren Kindern und Enkeln nicht versinkende Küstenstädte, versauernde Ozeane, brennende Wälder, überschwemmte Lebensräume und verdorrte Erde hinterlassen.

Eine offensichtliche Lösung ist die unerschöpfliche Energiequelle, die auch unser Klimasystem antreibt: die Sonne. In der Sonne haben wir den perfekt zuverlässig funktionierenden Fusionsreaktor mit einem beruhigenden Sicherheitsabstand von rund 150 Millionen Kilometern. Fortwährend badet sie uns in einem überreichlichen Photonenstrom. Könnten wir die bei uns ankommende Energie zu 100 Prozent nutzen – eine Stunde Sonneneinstrahlung würde ausreichen, die gesamte Menschheit mehr als ein Jahr lang mit Energie zu versorgen. Wir müssen den Energiestrom der Sonne nur entschlossener und effektiver nutzen. Technologien dafür haben wir bereits: Windräder, Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke, um nur einige zu nennen. Vieles muss und wird zweifellos noch verbessert werden: intelligente Netze, Speichertechniken, Elektrofahrzeuge. Angesichts der erfreulichen technologischen Fortschritte könnte man ganz entspannt und optimistisch in die Zukunft blicken, wenn nur ein Problem nicht wäre: Die Zeit läuft uns davon.

Wie kann die Klimaerwärmung eingedämmt werden?

Um die schlimmsten Folgen eines Klimawandels zu vermeiden, hat die Weltgemeinschaft 2010 in Cancun beschlossen, die globale Erwärmung auf unter 2° C über vorindustriellem Niveau zu begrenzen (Abb. 2). Hierzu ist es notwendig, die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre unterhalb von 450 ppm zu stabilisieren (möglicherweise auch nach einer zeitweiligen Überschreitung dieses Wertes).

Dieses Ziel kann erreicht werden, indem die weltweiten Emissionen an Treibhausgasen (nicht nur CO₂) bis 2050 im Vergleich zu 1990 mindestens halbiert werden. Dazu müsste der Höhepunkt der globalen Emissionen in spätestens zehn Jahren überschritten sein (Abb. 9).

Nach den aktuellen Ergebnissen der ökonomischen Modellierung (siehe u.a. Sonderausgabe des *Energy Journal*, Edenhofer *et al.* 2006) kann dies mit geringem Kostenaufwand (weniger als 1 % des Bruttosozialprodukts bis 2100) durch induzierte technologische Erneuerungen, einschließlich erhöhter Energieeffizienz und erneuerbarer Energietechnologien (Windenergie, Biomasse, Solarenergie), erreicht werden

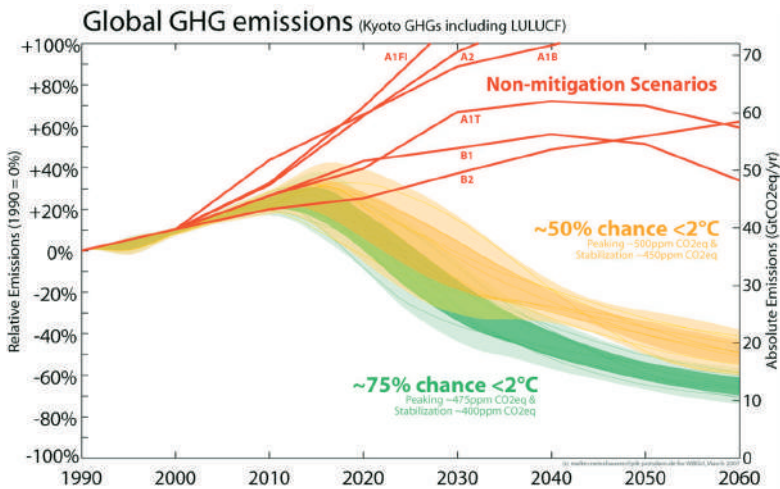


Abbildung 9: Vergleich unterschiedlicher Emissionsszenarien für den Zeitraum 1990 bis 2060. Rot sind die bekannten IPCC SRES-Szenarien ohne Klimaschutzmaßnahmen (*non-mitigation*). Orange gezeigt ist ein Bündel von Szenarien, bei dem mit 50 % Wahrscheinlichkeit das EU-2°C-Limit eingehalten wird. Grün sind Szenarien, bei denen dies mit 75 % Wahrscheinlichkeit der Fall ist. Quelle: Meinshausen, PIK 2007.

(Abb. 10). Die Kosten dieser Umstellung dürften einen Bruchteil der Kosten betragen, die durch einen ungebremsen Klimawandel auf uns zu kämen (Stern 2006). Detaillierte Szenarien für den dringend notwendigen Umbau des Energiesystems wurden u.a. durch den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2003) entwickelt. Technisch und wirtschaftlich ist das Klimaproblem durchaus zu lösen.

Im Wettlauf gegen die Zeit

Seit Rio sind so viele Jahre mit stetig steigenden Emissionen vergangen, dass die in Cancun immerhin beschlossene Begrenzung der Erderwärmung auf höchstens zwei Grad nur noch mit einer sofortigen und entschlossenen Kehrtwende zu erreichen ist. Wegen der langen Lebens-



Abbildung 10: Die Windenergie hat in Deutschland inzwischen einen Anteil von acht Prozent am Stromverbrauch erreicht. Foto: Stefan Rahmstorf.

dauer von CO_2 in der Atmosphäre (ein großer Teil wird auch in tausend Jahren noch in der Luft sein) bedeutet die Begrenzung der Erwärmung automatisch eine Begrenzung der Menge an CO_2 , die noch ausgestoßen werden kann. Und zwar nicht pro Jahr, sondern insgesamt. Wollen wir die Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 Prozent unter 2°C halten, können bis 2050 noch rund 700 Milliarden Tonnen CO_2 freigesetzt werden. Schon bei den heutigen Emissionen, also ohne weiteren Anstieg, hätten wir dieses Kontingent in weniger als 20 Jahren verbraucht. Mit jedem Jahr, in dem die Emissionen weiter steigen, schwinden die Chancen, die Erwärmung unterhalb unserer Zielmarke – 2°C – zu halten.

Vor 150 Jahren haben Tyndalls Messungen gezeigt, dass CO_2 Wärmestrahlung einfängt und so das Klima aufheizt. Seit 50 Jahren wissen wir, dass wir die CO_2 -Menge in der Luft nach oben treiben. Seit Jahrzehnten schreitet die Erwärmung wie vorhergesagt voran. Wie lange werden wir noch zaudern?

Literatur

- Archer, D. (2006) *Global Warming: Understanding the Forecast*. Blackwell.
- Archer, D., Rahmstorf, S. (2010) *The Climate Crisis*. Cambridge University Press.
- Arrhenius, S. (1896) On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. – *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 5, S. 237–276.
- Broecker, W.S. (1975) Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? – *Science* 189, S. 460–463.
- Edenhofer, O., Carraro, C., Koehler, J., Grubb, M. (2006) *Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation*. – A Special Issue of *The Energy Journal*, Vol. 27, International Association of Energy Economics, USA.
- Emanuel, K. (2005) Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. – *Nature* 436, S. 686–688.
- Keeling, C.D. (1960) The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. – *Tellus* 12, S. 200–203.
- Mann, M.E. et al. (2008) Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, S. 13252–13257.
- WBGU (2003) *Über Kioto hinaus denken*. – Sondergutachten, www.wbgu.de.
- WBGU (2006) *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*. – Sondergutachten, www.wbgu.de.
- Tyndall, J. (1859) Note on the Transmission of Radiant Heat through Gaseous Bodies. – *Proceedings of the Royal Society of London* 10, S. 37–39.
- Sawyer, J. (1972) Man-made Carbon Dioxide and the »Greenhouse« Effect. – *Nature* 239, S. 23–26.
- Rahmstorf S., Schellnhuber H.J. (2006) *Der Klimawandel – Diagnose, Prognose, Therapie*, München (C.H. Beck), 7. Auflage 2012.
- Stern, N. et al. (2006) *The Economics of Climate Change – The Stern Review* (HM Treasury, London).
- Rahmstorf, S., Richardson K. (2007) *Wie bedroht sind die Ozeane?* Frankfurt a.M. (Fischer Taschenbuch).
- Rahmstorf, S. (2011) *Wolken, Wind & Wetter – Alles, was man über Wetter und Klima wissen muss*. Ein Kinder-Uni-Buch. München (DVA).

Gerhard Gottschalk

EHEC – Wenn mikrobielle Evolution auf die Spitze getrieben wird¹

Mit kaum einem Bakterium ist die deutsche Öffentlichkeit durch die Medien so vertraut gemacht worden wie mit EHEC im Jahr 2011. EHEC ist ein pathogener, also krank machender Abkömmling unseres Darmbakteriums *Escherichia coli*, ein enterohämorrhagischer *E. coli*. Dieser Name besagt, dass EHEC im Darm lebt (Enteron) und dass er Blutungen (Hämorrhagien) hervorrufen kann. Kommt es im Verlauf der Infektion zu Blutungen und zum Nierenversagen, so spricht man von HUS, dem hämolytisch-urämisches Syndrom. Dieses ist eine schwere Komplikation, die mit neurologischen Ausfällen verbunden sein kann. EHEC ist nicht der einzige unangenehme Abkömmling von *E. coli*. Es gibt weitere, von denen besonders ETEC (entero-toxischer *E. coli*), der Erreger der Reisediarrhoe, vorgestellt wird. Der deutsche Ausbruchsstamm von 2011 hingegen ist ein genetisch weiter entwickelter EHEC, der zutreffender als EAHEC (entero-aggregativer hämorrhagischer *E. coli*) zu bezeichnen ist.

Bekanntschaft mit ETEC

Zehn Flugstunden von Deutschland entfernt, stellen sich bei Herrn G. Symptome ein, wie sie in jedem Jahr Millionen von Menschen, besonders bei Reisen in ferne Länder, das Vergnügen an dem verderben, was sie sich dort vorgenommen haben: Schweißausbrüche, Rebellion im Magen und immer häufiger werdende Toilettengänge. Herr G. schluckt Tabletten und trinkt Tee oder Coca Cola und sinniert darüber, woran es wohl gelegen haben möge. Waren es die Eiswürfel im Gin Tonic, die so leckeren Salate oder die köstlichen Muscheln? Der Zustand des Herrn G. verschlimmert sich und Kollegen organisieren seine Einwei-

1 Gerhard Gottschalk: Bakterien rüsten auf: EHEC und MRSA (ISBN 978-3-527-33300-4), Teil 1 EHEC. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.

sung in ein Krankenhaus, in dem er nach einer Eingangsuntersuchung an zahlreiche Tröpfe gehängt wird, gefüllt mit Flüssigkeiten, die Elektrolyte und Nährstoffe enthalten, sowie zwei Antibiotika, um Bakterien zu bekämpfen. Nach drei Tagen stellt sich Besserung ein, nach weiteren drei Tagen kann Herr G. die Heimreise antreten. Alle durchgeführten Tests zur Identifizierung des Keims verliefen negativ. Das ist eine Geschichte, wie sie sich jährlich millionenfach ereignet.

Als Mikrobiologe stellt Herr G. natürlich besonders intensive Überlegungen darüber an, welcher Keim ihn wohl in eine solche missliche Lage versetzt hat. Alles was wir zu uns nehmen, sinniert er, muss ja durch den Magen, und dort ist es ziemlich sauer. Eine Bakterienart hat aus dieser Not eine Tugend gemacht, *Helicobacter pylori*, der sich in der Magenschleimhaut einnistet, Entzündungen und sogar Magenkrebs hervorrufen kann. Mit Durchfällen hat er aber nichts zu tun. Alle übrigen Bakterien, die wir mit der Nahrung konsumieren, werden zum Teil durch die Säure im Magen abgetötet; ein gewisser Prozentsatz jedoch überlebt diese Tortur und wandert weiter durch unser Gedärm. Darunter sind sehr viele nützliche, wie die Milchsäurebakterien, die ja auch häufig in probiotischen Medikamenten enthalten sind. Aber über die guten denkt Herr G. nicht weiter nach. Welche Keime gehen denn einem Fachmann durch seinen fiebrigen Kopf, wenn sich sein Magen umdreht und der Darm nicht mehr das enthält, was er in guten Zeiten enthält und von Zeit zu Zeit in fester Form abgibt? Gefühlsmäßig schließt Herr G. eine Virusinfektion aus. Rotaviren kämen natürlich in Frage, aber ein nur geringer Fieberschub und auch die Zeit zwischen kaltem Buffet und Ausbruch (etwa 20 Stunden) sprechen dagegen. Salmonellen fallen ihm als Nächstes ein. Hier kommt es häufig bereits nach wenigen Stunden zu heftigem Erbrechen; der Grund ist, dass sich die Salmonellen in einem Nahrungsmittel bereits so stark vermehrt haben, dass die verschluckte Toxinmenge ausreicht, um die Erscheinungen einer Nahrungsmittelvergiftung auszulösen. Cholera und eine durch Shigellen hervorgerufene Ruhr sind unwahrscheinlich, da keinerlei Anzeichen für eine Blutzersetzung (Urämie) zu erkennen sind. Es verbleibt u.a. ETEC; dieses steht, wie bereits erwähnt, für enterotoxischer *E. coli*. Doch wie wird aus einem harmlosen Darmbewohner ein Krankheitserreger?

E. coli als Verwandlungskünstler

Die Bakterienart *Escherichia coli* wurde von dem Mikrobiologen Theodor Escherich erstmals beschrieben. Escherich wurde 1857 in Ansbach (Franken) geboren und arbeitete als Kinderarzt und Bakteriologe in Würzburg und Wien. 1885 beschrieb er ein Bakterium, das er aus den Exkrementen von Kindern isoliert hatte, und nannte es *Bacterium coli commune*. Wegen Escherichs großer Verdienste um die Bakteriologie wurde es später in *Escherichia coli* umbenannt. Dieses Bakterium spielt in unserem Darm keine dominierende Rolle, andere Arten haben einen größeren Anteil an den Umsetzungen im Darm. Trotzdem ist *Escherichia coli* das berühmteste Bakterium unter den Darmbewohnern; es lässt sich leicht züchten, und viele Entdeckungen auf dem Gebiet der Mikrobiologie, der Molekularbiologie und der Genetik sind mit dem Namen *Escherichia coli* verbunden. Einige dieser Entdeckungen werden uns die Augen in Bezug auf die Wandlungsfähigkeit von *E. coli* öffnen.

Wenn wir an Evolution denken, dann denken wir in Millionen oder gar Milliarden von Jahren. Vor etwa 3,5 Milliarden Jahren entstanden die ersten Mikroorganismen und für ungefähr 3 Milliarden Jahre blieben sie dann unter sich: Bakterien, Archaeen (letztere sind bakterienähnlich, repräsentieren aber eine eigene Domäne des Lebens) und Bakteriophagen, die Viren der Bakterien.^[1] Gärungsprozesse wie die Alkohol- und die Milchsäuregärung dominierten, dann aber entstanden lange vor den Pflanzen die Cyanobakterien. Sie waren die ersten Organismen, die die Lichtenergie nutzen und Sauerstoff produzieren konnten. Über einen unglaublich langen Zeitraum begann sich die Zusammensetzung der Erdatmosphäre zu verändern. Alle möglichen Substanzen wie Schwefelwasserstoff, Ammoniak oder reduzierte Eisenionen wurden oxidiert, und letztlich begann sich freier Sauerstoff in der Atmosphäre anzuhäufen. Vor etwa 500 Millionen Jahren war es dann so weit. Es entwickelten sich Pflanzen und Tiere, und die Kontinente füllten sich mit Leben. Damit eröffneten sich neue Räume für die Besiedlung durch Mikroorganismen: die Oberflächen von Pflanze und Tier, die Verdauungstrakte der Tiere und später des Menschen. Gerade aus Letzteren sind sie nicht wegzudenken. Im Darm des Menschen bauen sie die Nahrungsbestandteile ab, die unsere Verdauungsenzyme nicht verwerten können, und die Produkte dieses Abbaus, wie beispielsweise die Buttersäure, sind für unseren Darm wichtige Nährstoffe. Aber auch Vitamine werden gebildet, wie das Vitamin K. Es wird

von den Darmzotten aufgenommen und seinen Aufgaben in unserem Stoffwechsel zugeführt. Auch die Verdauung der Pflanzenfresser, wie die der Rinder, ist ohne mikrobielle Aktivität nicht vorstellbar. Der Pansen ist eine geräumige Gärkammer von etwa 100 Litern Inhalt, die mehrere Kilogramm Mikroben enthält. Der Abbau der Zellulose ist keineswegs eine Leistung von Verdauungssystemen des Rindes, vielmehr sind es Enzyme der Bakterien, die diesen Abbau bewerkstelligen und das Rind mit gut verdaubaren Substanzen versorgen. Als ein unerwünschtes, vom ganzen Stoffwechselgeschehen her gesehen freilich notwendiges Produkt im Pansen, treten große Mengen Methan auf. Es sind etwa 150 bis 200 Liter, die jede Kuh pro Tag an die Atmosphäre abgibt. Methan ist ein starkes Treibhausgas, weshalb Rinder nicht unwesentlich zum Treibhauseffekt beitragen.

Viele verschiedene Mikrobenarten waren bereits in den ersten drei Milliarden Jahren der Evolution entstanden, aber die Evolution der Bakterien ging auch mit dem Auftreten der Pflanzen und Tiere weiter. Sie bediente sich bewährter Mechanismen. Ständig entstanden veränderte Gene durch Mutation, Gene wurden gespalten und Genfragmente in unterschiedlicher Art und Weise wieder zusammengesetzt. Brachten diese »Neuschöpfungen« den mikrobiellen Besitzern Vorteile, dann gehörten sie bald zum Inventar; anderenfalls verschwanden sie schnell im Sumpf der Evolution. Es entstanden unzählige neue Bakterienarten mit einer Grundausstattung an Genen, die jeweils für eine bestimmte Art charakteristisch ist. Eine Art wie *Escherichia coli* ist eben *Escherichia coli* und nicht etwa *Clostridium tetani*, genauso wie ein Elefant ein Elefant ist und kein Affe. Daneben entstand ein Pool von Genen mit allerlei nützlichen Eigenschaften, wie Resistenzen gegenüber Antibiotika oder Toxinen, also Giften, wie das später noch zu erwähnende Shigatoxin. Dieser Genpool ist für das Wachstum und die Vermehrung der Bakterien eigentlich nicht essenziell. *E. coli*, der in einem Medium mit Mineralsalzen und bestimmten Zuckern wächst, braucht ihn nicht. Das ändert sich schlagartig, wenn beispielsweise ein Antibiotikum zugegen ist. Dann ist es ein Vorteil, wenn eine entsprechende Resistenz im Genpool vorhanden ist und Mobilität besitzt. Sie könnte dann von Mikroorganismus zu Mikroorganismus übertragen werden und Resistenz vermitteln. Wir sprechen von horizontalem Gentransfer, und *Escherichia coli* ist ein Meister darin, sich des horizontalen Gentransfers zu bedienen und sich auf diesem Wege mit neuen Eigenschaften zu versehen.

Drei Prozesse des horizontalen Gentransfers machen *E. coli* zum Verwandlungskünstler. Einmal ist es die Konjugation, die in *Escherichia coli* überhaupt erst entdeckt wurde. Bevor sie erklärt wird, soll auf die eklatanten Unterschiede in der genetischen Ausstattung von Mensch und Bakterium hingewiesen werden. Jede unserer Körperzellen verfügt über 23 Chromosomenpaare, bestehend aus insgesamt etwa drei Milliarden Bausteinen. Die Anzahl der darauf verschlüsselten Gene ist immer noch in der Diskussion. Auf den ersten Blick sind es nur 23.700, man wird aber wohl das Vierfache erwarten dürfen. Die meisten Bakterien, so auch *E. coli*, enthalten dagegen nur ein einziges, ringförmiges Chromosom. Bei *E. coli* ist es etwa fünf Millionen Bausteine groß und umfasst ungefähr 4.600 Gene. Darüber hinaus gehört häufig ein so genanntes Plasmid zur genetischen Ausstattung der Bakterien. Das ist ein kleiner DNA-Ring, der nur etwa ein Prozent der genetischen Information des Chromosoms enthält. Eine bestimmte Form des Plasmids, das F-Plasmid, besitzt nun die faszinierende Eigenschaft, die Synthese einiger Zellkomponenten so zu steuern, dass sich zwei *E. coli*-Zellen annähern und über eine Brücke vorübergehend miteinander verbinden. Dieser Prozess erinnert an das Betanken von Flugzeugen in der Luft. Hier kommt es ja ebenfalls zu einer vorübergehenden Verbindung zwischen zwei Flugzeugen, und dann fließt das Kerosin von dem einen über ein Verbindungsmodul in das andere. Auch von der *E. coli*-Zelle, von der die Initiative ausgeht – sie ist die Spenderzelle – fließt etwas in die Empfängerzelle; es ist eine Kopie der Plasmid-DNA, so dass nach Abschluss dieses Prozesses sowohl die Spenderzelle als auch die Empfängerzelle die zusätzliche genetische Information in Gestalt des Plasmids enthalten. Plasmide sind eine der treibenden Kräfte in der Evolution. Sie können sich durch Aufnahme von genetischer Information vergrößern und dann durch Konjugation zur Ausbreitung dieser Information beitragen. Plasmide sind Trojaner, die Antibiotika- oder Metallresistenzen oder Toxine, aber auch so manches, was für unsere Umwelt nützlich ist, im Gepäck haben. So verwerten bestimmte Bakterienarten genetische Information aus Plasmiden, um Erdöl abzubauen. Und diese genetische Information für den Erdölabbau wird benötigt, damit Bakterien Ölverschmutzungen nach Katastrophen wie 2010 im Golf von Mexiko beseitigen können.

Zur Erklärung des zweiten Prozesses des horizontalen Gentransfers müssen wir auf Bakteriophagen, die Viren der Bakterien, zu sprechen kommen. Berühmt ist der Lambda-Phage. Wie auch andere Phagen

entlässt er seine DNA in die Bakterienzelle, ein Vorgang, der an die Injektion eines Medikaments in den Muskel oder die Vene erinnert. Ist die DNA in der Zelle angekommen, so können sich zwei Prozesse anschließen. Die DNA kann den gesamten Stoffwechsel der *E. coli*-Zelle umprogrammieren und alles in den Dienst der Vermehrung der Bakteriophagen stellen. Als Ergebnis werden nach etwa 30 Minuten bis zu 200 Bakteriophagen aus der zerstörten *E. coli*-Zelle freigesetzt. Dieser Prozess, vergleichbar mit der Freisetzung von Viren aus menschlichen Zellen, hat für die Evolution eine nicht so große Bedeutung wie der zweite, bei dem sich die Phagen-DNA im Chromosom einnistet. Dort residiert sie mehr oder weniger unerkannt, bei der Teilung der Zellen wird sie mitvermehrt. Man bezeichnet dieses Stück DNA als Prophagen. Hier haben wir es nun nicht mehr mit etwas rein Zerstörerischem zu tun, vielmehr mit Vorgängen, die für die Bakterienzelle durchaus nützlich sein können. Man stelle sich vor, der Phage hätte durch irgendein Ereignis einige Gene in seine DNA eingebaut, die die genetische Information für ein Toxin enthielten. Die *E. coli*-Zelle könnte dann zu einem Toxinproduzenten werden, beispielsweise zu einem ETEC.

Der dritte Prozess führt uns direkt in die mikrobielle Evolutionsküche hinein, es ist die Aufnahme nackter DNA. Es gibt in unserem Universum etwa 10^{22} Sterne, aber auf unserem Planeten 5 mal 10^{30} Mikrobenzellen und 10^{31} Viren. An vielen Standorten herrscht ein dichtes Gedränge: in den bereits erwähnten Verdauungstrakten, in Schlämmen und Sümpfen und in vor sich hin faulendem organischem Material. In Gestalt von Kläranlagen, Biotonnen und verseuchten Seen und Flüssen haben wir den Mikroben weitere »Küchen« für ein florierendes Wachsen und Vergehen eingerichtet. Gerade wo sie eng beieinander sind, findet in jeder Sekunde ein milliardenfacher Gentransfer statt. Plasmide werden übertragen und auch wieder freigesetzt; Bakteriophagen dringen ein, zerstören Zellen oder lassen sich als Prophagen in den Chromosomen nieder. Und dazwischen liegt massenhaft nackte DNA, freigesetzt aus abgestorbenen Zellen. Die Aufnahme von DNA-Bruchstücken durch Bakterien bezeichnet man als Transformation. *E. coli* ist kein Experte auf diesem Gebiet, aber viele andere Bakterienarten um ihn herum verfügen über höchst effektive Aufnahmesysteme und intrazellulär über einen Apparat, der das Einnisten der DNA-Bruchstücke in das Bakterienchromosom steuert. Die Bedeutung dieses Prozesses muss man sich noch einmal vor Augen führen: Transformation bewirkt, dass »dem Tode geweihte« genetische Information durch Aufnahme und

Einbau in die Chromosomen wachsender und sich vermehrender Bakterien wieder »zum Leben erweckt« wird. Viele DNA-Fragmente enthalten nichts Nützliches. Mitunter finden sich jedoch Gengruppen zusammen, die gemeinsam etwas bewirken. Sie könnten die Information für Enzymsysteme enthalten, die den erwähnten Abbau von Erdöl bewerkstelligen. Es könnten aber auch krank machende Gene sein, also Gene, auf denen Pathogenitätsfaktoren verschlüsselt sind. Gerade diese haben große Bedeutung. Sie entwickelten sich zu Gen-Inseln, die wie Fremdkörper in das Chromosom eingeschoben sind, und sie besitzen Mobilität. In etwa 30 verschiedenen Bakterienarten (einschließlich *E. coli*) wurden sie nachgewiesen, und die Würzburger Mikrobiologen Werner Goebel und Jörg Hacker prägten für sie den Begriff Pathogenitätsinseln, kurz PAIs.^[2] Es sind mobile Gen-Einsatztrupps. Wie sie sich exakt von Bakterienart zu Bakterienart bewegen, ist noch ein Rätsel.

Die Transformation ist ein faszinierender Prozess. Ihre Entdeckung durch Frederick Griffith 1928 war spektakulär, zumal man zu jener Zeit noch gar nicht wusste, dass die DNA die Trägerin der genetischen Information ist. Griffith untersuchte *Streptococcus pneumoniae*, einen gefürchteten Erreger von Lungenentzündungen. Diese Pneumokokken, wie man sie auch nennt, kommen in zwei Varianten vor: Der von einer Kapsel umhüllte S-Stamm ist pathogen und der kapselfreie R-Stamm harmlos. Griffith mischte den harmlosen R-Stamm mit abgetöteten Zellen des S-Stammes und injizierte die Mischung in Mäuse. Die Mäuse erkrankten und aus den Sekreten konnte Griffith den lebenden S-Stamm isolieren. Genetische Information, es ist DNA, wie wir heute wissen, war aus den toten Zellen des S-Stammes von dem R-Stamm aufgenommen worden und hatte diesen in den S-Stamm verwandelt. Natürlich führte Griffith alle nur denkbaren Kontrollen durch. Das Ergebnis hielt stand; das Experiment wurde viele Male wiederholt und ist heute ein Klassiker. Man staunt, was im Reich der Bakterien alles möglich ist. Ein solcher Gentransfer ist in höheren Organismen undenkbar.

Fassen wir zusammen: Mit der Konjugation, den Bakteriophagen und Prophagen sowie mit der Transformation haben wir die genetischen Werkzeuge beisammen, die bei den Mikroben biologische Information durch horizontalen Gentransfer verbreiten. Sie unterstützen *E. coli* bei seinen Verwandlungskünsten. Dabei wird die DNA in Form von Plasmiden, Prophagen oder Pathogenitätsinseln transportiert. Darauf können Toxine, Systeme zur Anheftung an Darmzotten sowie andere Virulenz-

faktoren verschlüsselt sein; bestimmte Kombinationen können zu unterschiedlichen Pathotypen wie ETEC oder EHEC führen.

Escherichia coli entstand in seiner »Evolutionküche« vor etwa 100 Millionen Jahren. Genauer gesagt, ein Vorläufer spaltete sich in *Salmonella* und *Escherichia* auf.^[3] 35 Millionen Jahre lang lebte also *E. coli* zusammen mit den Dinosauriern, die ja vor etwa 65 Millionen Jahren ausstarben. Ihre riesigen Verdauungsapparate waren sicher reizvoll für ihn. Ob er das dortige Nahrungsangebot nutzte oder sich woanders ernährte, ist eine Frage, auf die wohl nie eine Antwort gegeben werden kann. Jedenfalls war *E. coli* bereits präsent, als die Säugetiere auf der Bildfläche erschienen und dann seit etwa 200.000 Jahren auch der menschliche Darm als Betätigungsfeld zur Verfügung stand. Die gerade beschriebenen Werkzeuge für die Verwandlung eines harmlosen Darmbewohners in seine weniger angenehmen Pathovarianten entwickelten sich dann wohl bereits vor langer Zeit; einige dieser Pathovarianten werden jetzt vorgestellt.

ETEC, der unangenehme Reisebegleiter

Der Befund ist alarmierend: Eric Elsinghorst berichtet, dass die Zahl der ETEC-Infektionen pro Jahr weltweit bei 600 Millionen liegt.^[4] Hier sind Mehrfachinfektionen mitgezählt, denn sonst würden ja etwa zehn Prozent der Weltbevölkerung an ETEC erkranken. So viele sind es zwar nicht, aber immerhin drei bis vier Prozent. Etwa 800.000 Todesfälle, meistens Kinder unter fünf Jahren, sind jährlich zu beklagen. Von ETEC-Infektionen werden eben nicht nur Besucher Lateinamerikas, Asiens und Afrikas heimgesucht, die dann von »Montezumas Rache« oder dem »Fluch des Pharao« sprechen. Unter der einheimischen Bevölkerung sind in erster Linie Kinder betroffen, besonders Säuglinge und Kleinkinder. Mit der Zeit wächst die Immunantwort in den Epithelien, und die Bakterien können sich nicht mehr so gut anheften und vermehren. Dieser sich allmählich entwickelnde Schutz fehlt bei einheimischen Kleinkindern und auch bei den Touristen. Die Wege, die zu ETEC-Infektionen führen, sind eigentlich klar. Immer sind fäkale Verunreinigungen beteiligt. Ist die Trinkwasseraufbereitung nicht wirksam genug, gelangt ETEC in viele Nahrungsmittel, darüber hinaus werden gerade Säuglinge durch Schmierinfektionen angesteckt. Für eine erfolgreiche Infektion muss man mehr als 100 Millionen (10^8) ETEC-Zellen

verschlucken. Das klingt nach sehr viel, man muss aber bedenken, dass eine ETEC-Zelle nur 10^{-12} g, also ein Billionstel Gramm wiegt. 100 Millionen Zellen in einem Glas Wasser sieht man nicht, das Wasser ist völlig klar, selbst ein Eiswürfel mit 10^8 ETEC-Zellen sieht sehr appetitlich aus. Unser Auge und auch die anderen Sinnesorgane versagen hier als Kontrollinstanzen.

Zwei Eigenschaften machen ETEC zu dem, was er ist. Erstens hat er die Fähigkeit, kleine Härchen (Fimbrien) zu bilden, mit denen er sich am Darmepithel festhalten kann. Das ist die Voraussetzung dafür, dass er sich dort vermehren und Zellverbände bilden kann. Zweitens stellt er ein Enterotoxin her, das Ähnlichkeit mit dem vom Choleraerreger produzierten Gift hat. In der Darmschleimhaut wird durch dieses Toxin gewissermaßen eine Schleuse geöffnet, Chlorid- und Natriumionen werden freigesetzt, gefolgt von einem massiven Wassereinstrom in den Darm. Das Ergebnis ist Durchfall, die Diarrhoe.

Die genetischen Werkzeuge für ETEC sind seit Tausenden von Jahren präsent. Die krank machenden Gene für das Festsetzen der Zellen und für das Toxin befinden sich auf Plasmiden. Damit sind sie in hohem Maße mobil. ETEC-Stämme entstehen und verschwinden wieder, aber sie sind nicht ausrottbar, weil die Plasmide immer in irgendeinem Verdauungstrakt oder in einer Dunggrube schlummern, jederzeit bereit, von harmlosen *E. coli*-Zellen aufgenommen zu werden. Um ETEC-Infektionen so effektiv wie möglich zu verhindern, bedarf es besonders in dicht besiedelten Gebieten folgender Maßnahmen: Fäkalien und die entsprechenden Abwässer müssen so lange für sich gehalten werden, bis der Titer von *E. coli* samt seiner Pathovarianten gegen null gegangen ist. Mit anderen Worten, Trinkwassergewinnung und Abwasserentsorgung müssen so gut wie nur irgend möglich getrennt gehalten werden. Da, wo das aus Gründen von Wasserknappheit nicht möglich ist, müssen effektiv arbeitende Kläranlagen, Filter und ausreichende Verweilzeiten dafür sorgen, dass *E. coli* und seine Plasmide weitestgehend verschwinden. Nichts ist so ungesund für *E. coli* wie sauberes Wasser. Reisende können sich schützen, indem sie nichts Rohes zu sich nehmen, nur Gekochtes oder Geschältes. Bei den Flüssigkeiten sind Bier, Cola und ähnliche Getränke sowie in Flaschen abgefülltes Wasser mit Originalverschluss zu empfehlen. Bei der Überwindung der Infektion helfen Darmberuhigungsmittel (z.B. Imodium), Flüssigkeiten mit Elektrolyten und Antibiotika (hier ja, bei EHEC – siehe unten – mit Einschränkungen).

Der eigentliche EHEC

Das, was in den Monaten Mai bis Juli 2011 als eine der schlimmsten Bakterienepidemien in Deutschland grassierte, hat mit dem »klassischen« und seit den 1970er-Jahren bekannten EHEC wenig zu tun. EHEC, der entero-hämorrhagische *E. coli*, unterscheidet sich in mehreren Merkmalen von ETEC. So verfügt er über einen anderen Mechanismus zur Einnistung in das Darmepithel, und er bildet anstelle des Enterotoxins das gefährliche Shigatoxin.^[5] Auch ist er widerstandsfähiger gegenüber der Magensäure. Als Folge dieser Veränderungen reicht eine viel geringere Zahl von Bakterienzellen aus, um eine Infektion auszulösen. Es sind weniger als 100 (10^2) im Gegensatz zu den erforderlichen 10^8 ETEC-Zellen. 100 Zellen sind praktisch nichts! Legt man das bereits erwähnte Gewicht einer Zelle von etwa 10^{-12} g zugrunde, so sind es 0,1 Milliardstel Gramm EHEC-Zellen, die einen Menschen krank machen können. Da drängt sich natürlich die Frage auf, weshalb die Menschheit nicht bereits an EHEC zugrunde gegangen ist. Das hängt damit zusammen, dass EHEC seine Waffen in der Natur glücklicherweise häufig wieder verliert; er ist nicht stabil. Die erste Waffe verstärkt den Kontakt des Erregers mit der Darmwand (Abb. 1). Der EHEC-Erreger heftet sich nicht nur an das Darmepithel an, vielmehr nistet er sich regelrecht ein. Dazu befähigen ihn die Proteine, die auf LEE codiert sind. LEE ist eine Pathogenitätsinsel und bedeutet *Locus of Enterocyte Effacement*. Der Enterozyt ist der häufigste Zelltyp im Darmepithel. Diese Zellen werden von EHEC angesteuert, wobei es zu einer derart innigen Verbindung mit den Enterozyten kommt, dass Komponenten wie etwa das Shigatoxin direkt in die Zellen injiziert werden können. Und damit kommen wir zu seiner zweiten Waffe, diesem gefährlichen Gift. Im Verlauf einer Ruhrepidemie in Japan in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts isolierte Kijoshi Shiga den dafür verantwortlichen Bakterienstamm und beschrieb ihn 1898 als *Bacillus dysenteriae*. Er wurde später in *Shigella dysenteriae* umbenannt, und das von ihm gebildete Toxin als Shigatoxin bezeichnet. Dieses Toxin gibt es in mehreren Varianten. Besonders die Variante Stx2 ist im Menschen ein »Draufgänger«: Es dringt in die Epithelzellen ein, wandert durch die Zellverbände und hinterlässt eine Straße der Verwüstung. Als Folge kommt es zur Zersetzung der roten Blutkörperchen, verbunden mit einer blutigen Diarrhoe. Die Glomerula (Filtrationsmodule) der Nieren werden geschädigt, was die Filtrationsleistung dieser Organe beeinträchtigt

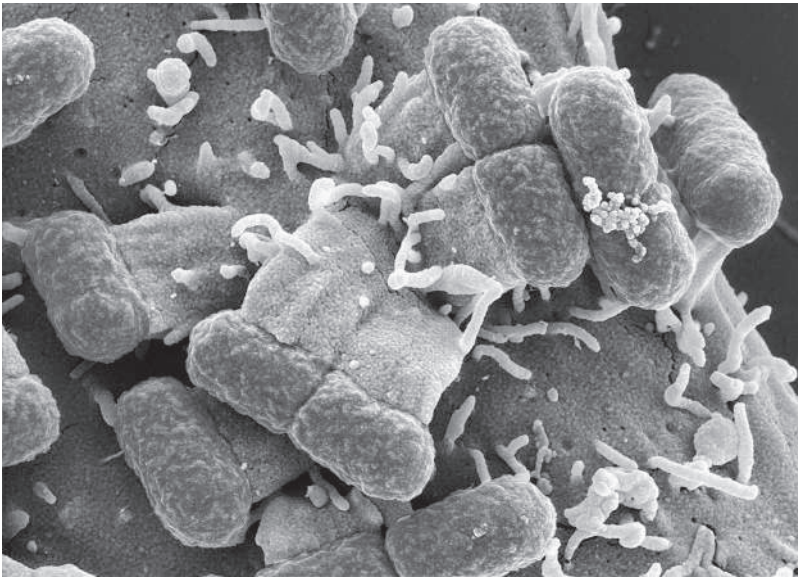


Abbildung 1: Elektronenmikroskopische Aufnahme von EHEC auf Fibroblasten (Bildnachweis: Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung/M. Rohde).

oder gar gänzlich ausschaltet. Es hat sich das hämolytisch-urämische Syndrom (HUS) ausgebildet, das diese Infektionen besonders gefährlich macht. Wie kommt *E. coli* zu dem gefährlichen Shigatoxin? Die Gene dafür sitzen auf der DNA von Bakteriophagen. Diese dringen in *E. coli*-Zellen ein, und die Phagen-DNA mit dem Stx2-Gen nistet sich als Prophage in der Bakterien-DNA ein. Was EHEC also gefährlich macht, sind zwei mobile genetische Elemente: LEE als Pathogenitätsinsel und Stx2 als Teil eines Prophagen. Deshalb führt eben der Weg von EHEC auch leicht wieder zurück. Aus EHEC entstehen durch Verlust dieser mobilen genetischen Elemente leicht wieder harmlose *E. coli*-Stämme, die unauffällig in Verdauungstrakten ihr Leben fristen oder auf dem mikrobiellen Schrottplatz enden.

Der Serotyp, der am häufigsten bei EHEC-Ausbrüchen isoliert wurde, heißt *E. coli* O157:H7. Übrigens ist der Serotyp eine Art immunologischer Bakterienausweis, eine ID. Die Oberflächenstrukturen (Antigene) der Bakterien sind ziemlich variabel, aber stammspezifisch und werden von speziellen Antikörpern erkannt. Jeder Stamm wird mit

einer Kollektion von Antikörpern verglichen und erhält auf der Grundlage der Ergebnisse eine ID, z.B. O157:H7. Neu isolierte Stämme können dann entsprechend zugeordnet werden.

Seit 1982 kennen wir den Stamm O157:H7 als Auslöser von EHEC. Die beiden spektakulärsten Infektionswellen, hervorgerufen durch diesen Stamm, ereigneten sich 1996 in Japan und 2006 in den USA. In den Grundschulen von Sakai im Bezirk Osaka erkrankten 6.000 Kinder. Davon mussten 1.000 in Krankenhäuser eingewiesen werden, bei etwa 100 Kindern entwickelte sich HUS, drei Patienten verstarben.^[6] Die Infektion wurde auf den Verzehr von Radieschensprossen (*kaiware-daikon*) in einem am 8. oder 9. Juli 1996 servierten Lunch zurückgeführt. Der EHEC-Ausbruch in den USA zog sich über einen längeren Zeitraum hin.^[7] Die erste Welle im September 2006 wurde auf kontaminierten Spinat zurückgeführt und die zweite im November/Dezember 2006 auf Eisbergsalat. Insgesamt erkrankten 200 Personen, drei verstarben. Hier wurde EHEC offenbar über kontaminierte Bewässerungssysteme verbreitet. Hunderte von kleineren EHEC-Ausbrüchen wurden registriert. Diese sind in Deutschland meldepflichtig, und man kann die Zahlen in den infektionsepidemiologischen Jahrbüchern meldepflichtiger Krankheiten des Robert Koch-Instituts nachlesen. Demnach gab es in Deutschland im Jahr 2010 918 EHEC-Fälle. Das HUS-Syndrom wurde bei 65 Patienten diagnostiziert. Zum Vergleich: Es wurden im selben Jahr über 60.000 Fälle von Durchfallerkrankungen registriert, die auf Infektionen durch das Bakterium *Campylobacter* zurückgehen. Dieses sind sehr ernst zu nehmende Infektionen, die aber hier nicht weiter behandelt werden sollen.

Was wissen wir über den *E. coli*-Stamm O157:H7 sonst noch? Das Genom des in Sakai isolierten Erregers wurde bereits 2001 entschlüsselt.^[6] Wenn man es mit dem des harmlosen Darmbakteriums *E. coli* vergleicht, dann ist es genetisch geradezu überfrachtet. Der harmlose Stamm kommt mit 4,6 Millionen DNA-Bausteinen aus, der Stamm O157:H7 verfügt über 5,5 Millionen. Was für ein »Mehr« an genetischer Information! Wir kennen bereits LEE, die Pathogenitätsinsel, und den Stx2-Prophagen. Stamm O157:H7 besitzt weitere 23 Prophagen und hält mit den darauf verschlüsselten Leistungen sicherlich noch weitere Überraschungen bereit. Übrigens ist Stamm O157:H7 ungefähr 4,5 Millionen Jahre alt. Woher weiß man das? Vergleichbar mit den Jahresringen bei den Bäumen, haben Bakterien »Hunderttausendjahresringe«. Es sind hochkonservierte Gene, die für die Bakterien lebenswichtig

sind. Sie waren bereits vor ein paar Milliarden Jahren da und ändern ihre Zusammensetzung durch Mutation in unvorstellbar langen Zeiträumen. Angenommen, Stamm O157:H7 entstand in Nordamerika, dann war der Verdauungsapparat von Büffeln wohl seine »Evolutionssküche«.

Zurück zum Menschen und zu EHEC-Infektionen, die bekämpft werden müssen: Für die Therapie gab die Deutsche Gesellschaft für Infektiologie am 4. Juni 2011 Empfehlungen ab.^[8] Bestimmte Antibiotika bewirken offenbar eine verstärkte Ausschüttung des Shigatoxins und verschlimmern dadurch das Krankheitsbild. Zu dieser Gruppe von Antibiotika gehören Fluorchinolone, Cotrimoxazol und Aminoglykosid-Antibiotika. Penicilline und Cephalosporine versagen wegen vorhandener Resistenzen im EHEC-Erreger. Jedoch können Clindamycin, Rifampicin und Carbapenem-Präparate appliziert werden. Das gibt Hoffnung: EHEC im Darm lässt sich also mit bestimmten Antibiotika wirksam bekämpfen.

Intermezzo mit weiteren *E. coli*-Stämmen

Die Pathowelt des *E. coli* ist mit ETEC und EHEC noch nicht am Ende. Jährlich haben in der Bundesrepublik Deutschland mehr als eine Million Menschen eine Blasenentzündung. Häufig dafür verantwortlich ist ein UPEC, ein uro-pathogener *E. coli*. Die beiden besonders gut untersuchten Stämme 536 (in Deutschland sehr verbreitet) und CFT073 (kommt häufig in den USA vor) besitzen mehrere Pathogenitätsinseln, auf denen die Fähigkeiten zur Synthese von Härchen (Fimbrien) zum »Festhalten«, zur Biofilmbildung und zur Hämolyse verschlüsselt sind. Mikrobielle Biofilme sind glitschige Ansammlungen von Bakterien beispielsweise auf Steinen, in Abwasserkanälen oder eben auf der Blasenwand.

Auch EPEC, entero-pathogener *E. coli*, ist erwähnenswert, er wurde bereits 1945 als ein *E. coli*-Pathotyp erkannt. Er ist besonders für Diarrhoen bei Kindern in Asien verantwortlich. Wie EHEC verfügt auch EPEC über die Pathogenitätsinsel LEE, kann sich also einnisten und Virulenzfaktoren in das Epithel injizieren. Ihm fehlt allerdings die genetische Information zur Shigatoxinbildung, und deshalb ist er weniger gefährlich.

Der Vorläufer des deutschen Ausbruchstamms von 2011 heißt EAEC. Eine bisher noch nicht erwähnte Gengruppe begegnet uns, wenn wir auf EAEC schauen, den entero-aggregativen *E. coli*. Er löst

besonders bei Kindern Diarrhoen aus, die aber im Vergleich zu EHEC-Infektionen milde verlaufen. Besonders ausgeprägt ist bei EAEC-Stämmen ihr Aggregationsverhalten. Sie besitzen *aggregative adherence fimbriae* (AAFs), also verklebende Härchen, durch die die Bakterienzellen miteinander und mit den Epithelzellen aggregieren; sie verklumpen regelrecht und bilden im Darm massive Biofilme. Diese Fähigkeit hat weitreichende Konsequenzen, worauf wir im nächsten Abschnitt zurückkommen werden. Die genetische Information für die AAFs ist auf einem Plasmid verschlüsselt, das als pAA-Plasmid bezeichnet wird.

Dies soll den Reigen der *E. coli*-Stämme beschließen, aber nicht ohne Hinweis darauf, dass es noch etwa zehn weitere Pathotypen von *E. coli* gibt.

Der deutsche *E. coli*-Ausbruch von Mai bis Juli 2011

Tausende Male haben Ärzte, Patienten, Mikrobiologen, Politiker, Journalisten und allgemein die besorgte Öffentlichkeit das Wort »EHEC« in den Mund genommen, nicht nur in Deutschland, sondern überall in der Welt. Jeder Fetzen an Information wurde weltweit registriert und in Blogs diskutiert. Zugängliche Daten über die Sequenz der DNA-Bausteine des Erregers wurden innerhalb von Stunden von Bioinformatikerinnen und Bioinformatikern von Neuseeland bis Kanada interpretiert. Die Patienten lagen noch in den Kliniken, aber die DNA »ihres« Erregers lief bereits durch automatische Sequenzieranlagen. Schnell wurde klar, dass der deutsche Ausbruchskeim eigentlich kein EHEC ist. Der Begriff aber war in der Welt und während der Epidemie nicht zu korrigieren. Dass es sich um etwas anderes handelte, ging eigentlich schon daraus hervor, dass häufig von einem besonders aggressiven EHEC-Erreger gesprochen wurde. Nun, Aggressivität ist eigentlich nur eine Eigenschaft höherer Organismen. Wenn sich der Keim in einem vergleichbaren Milieu, eben im Darm, anders als EHEC verhält, dann ist es eben kein EHEC. Der Unterschied wird später erklärt; wir nennen aber den Ausbruchsstamm schon jetzt bei seinem richtigen Namen, EAHEC (entero-aggregativer hämorrhagischer *E. coli*).

Nach Angaben des Robert Koch-Instituts begann der EAHEC-Ausbruch am 1. Mai 2011 und erreichte seinen Höhepunkt am 22. Mai. Im Juli traten nur noch wenige Erkrankungen auf, und am 25. Juli wurde der letzte EAHEC-Patient in ein Krankenhaus eingeliefert. Am häufigsten trat die Erkrankung in den Bundesländern Schleswig-Holstein,

Niedersachsen und Hamburg auf. Insgesamt erkrankten 4.321 Menschen, davon 852 an HUS, 50 Menschen verstarben.^[9] Diese Zahlen dokumentieren, dass sich bei 20 % der EAHEC-Infizierten das so gefährliche HUS entwickelte. Ein so hoher Prozentsatz wurde vorher noch nie beobachtet. Viele HUS-Patienten hatten noch Monate später mit den Folgen dieser Infektion zu kämpfen.

Mitteilungen des ECDC (*European Centre for Disease Prevention and Control*) zufolge erkrankten außerhalb Deutschlands 124 Menschen an EAHEC, davon entwickelten 49 HUS.^[10] Hierbei handelte es sich überwiegend um Personen, die von einer Reise aus Deutschland zurückgekehrt waren.

Ein EAHEC-Fall ist Frau Dr. T., die am 14. und 15. Mai 2011 in Hamburg an einer Fortbildung teilgenommen hatte. Vor der Abreise kaufte sie sich noch schnell auf dem Hamburger Bahnhof ein mit Sprossen belegtes Bagel und verzehrte es. In den darauffolgenden Tagen hatte sie keine gesundheitlichen Probleme. Am 21. Mai jedoch kam es ein einziges Mal zu einer blutigen Diarrhoe. Der Darm beruhigte sich dann wieder bis zum 23. Mai nachmittags. Dann setzten blutige Diarrhoen ein und Frau Dr. T. hatte heftige Bauchschmerzen. Am 24. Mai war sie EAHEC-positiv. Trotzdem erholte sich Frau Dr. T. vorübergehend. Am 29. Mai wurde aber eine deutliche Verschlechterung ihrer Blutwerte festgestellt, sie wurde in das Göttinger Universitätsklinikum eingewiesen und musste sich in den nächsten Tagen mehrfach einer Plasma-Apherese, einer Blutwäsche, unterziehen. Bereits am 30. Mai war sie EAHEC-negativ. Ab dem 31. Mai verbesserten sich ihre Blutwerte und am 4. Juni wurde sie wieder aus dem Klinikum entlassen. Man kann sagen, ein bei allen Beschwerden noch glimpflich verlaufener Fall: Es gab keine neurologischen Komplikationen, die Nieren erholten sich schnell wieder, Antibiotika wurden nicht eingesetzt. Die Plasma-Apherese, also die Abtrennung von Toxinen und weiteren angestauten Substanzen aus dem Blut, war die entscheidende Therapie. Bei der Behandlung anderer Patienten bewährte sich ein Antikörper, der eigentlich noch gar nicht für diese Art von Applikation vorgesehen war. Erstaunlich ist, dass Frau Dr. T. so schnell wieder EAHEC-negativ wurde. Hier gibt es offenbar große Unterschiede. Weshalb andere Patienten über einen längeren Zeitraum EAHEC-Ausscheider bleiben, bedarf weiterer Untersuchungen. Auffallend ist auch, dass überwiegend Erwachsene erkrankten, und dabei Frauen weit häufiger als Männer. Gründe hierfür könnten unterschiedliche Essgewohnheiten sein.

Die Bedingungen für die Bekämpfung der EAHEC-Epidemie waren denkbar günstig. Das von Professor Helge Karch geleitete Konsiliarlabor in Münster ist die Sammelstelle für alle *E. coli*-Pathotypen, insbesondere für HUS-Stämme. Dort werden die erwähnten Serotypisierungen vorgenommen und diagnostische Verfahren zur schnellen Detektion bestimmter Pathotypen entwickelt. Der Serotyp wurde als O104:H4 identifiziert, und in Kooperation mit dem Robert Koch-Institut standen innerhalb von Tagen spezifische Erkennungsverfahren für den Ausbruchskiem zur Verfügung.^[11, 12] Die einschlägigen Untersuchungsämter wurden mit den nötigen Informationen ausgestattet, ebenfalls Diagnostiklaboratorien und schließlich die Krankenhäuser. Besondere Heraushebung verdient die ärztliche und pflegerische Versorgung in den Kliniken, die vielen Infizierten das Leben rettete, beziehungsweise Dauerschäden, beispielsweise an den Nieren, verhinderte. Laut Information des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf von Juli/August 2011 wurden dort 174 Kinder und Erwachsene auf höchstem Niveau versorgt. In der Uniklinik Schleswig-Holstein wurden in Spitzenzeiten bis zu 200 EHEC-Patienten behandelt, davon nahezu 100 mit HUS. In der Medizinischen Hochschule Hannover waren es 65 Patienten.^[13]

Die Frage nach der Herkunft des Keims brachte Politiker, Epidemiologen, Beamte und Ärzte beinahe zu lange in Erklärungsnöte. Der Druck wurde zunehmend unerträglich, und dann fiel ein begründeter Verdacht auf Sprossen. Aufatmen und Erleichterung; wir erinnern uns, dass der große EHEC-Ausbruch in Japan 1996 ebenfalls durch Sprossen verursacht wurde. Was spricht für Sprossen? Die Samen kommen aus aller Herren Länder. Wenn es einige *E. coli*-Zellen schaffen, die lange Reise zu überleben, dann haben sie bei der Sprossenherstellung ideale Vermehrungsbedingungen. Es ist gemütlich warm und feucht, mit den Sprossen wächst möglicherweise gleichzeitig eine Population von *E. coli*-Pathotypen in einer Größenordnung heran, die zur Auslösung von Infektionen ausreicht. Es wurde ja bereits erwähnt, dass etwa 100 EHEC-Zellen zur Auslösung einer Infektion in der Lage sind, und EAHEC hat sicherlich ein vergleichbares Potenzial.

Wenn wir die bisher vorgestellten *E. coli*-Pathotypen noch einmal Revue passieren lassen, dann wird deutlich, dass sie unterschiedliche Systeme zur Verfügung haben, um sich festzuhalten: Fimbrien bei ETEC und UPEC, LEE-Module bei EHEC und die aggregierenden Fimbrien AAF bei EAEC. Aber was ist mit EAHEC? Es ist schon bemer-

kenswert, wie schnell nach dem Ausbruch die ersten wissenschaftlichen Veröffentlichungen erschienen. Unter der Federführung des Instituts für Hygiene der Universität Münster und des Robert Koch-Instituts kamen die ersten epidemiologischen Arbeiten bereits am 22. und 23. Juni heraus.^[11, 12] DNA-Bausteinanalysen (Genomsequenzierungen) von EAHEC-Stämmen wurden noch während der Epidemie in Zentren von Peking über Göttingen und Münster bis Cambridge/UK durchgeführt,^[14-16] danach auch in weiteren Laboratorien. Worin unterscheidet sich EAHEC nun von den normalen EHEC-Stämmen? Das Göttinger Laboratorium für Genomanalyse mit mehrjähriger Erfahrung in der Sequenzanalyse von *E. coli*-Stämmen dokumentierte durch Sequenzvergleich eine mehr als 96%ige Identität von EAHEC mit einem EAEC-Stamm,^[13] der vor zehn Jahren von einem HIV-Patienten in Südafrika isoliert worden war. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und diverse Blogs stimmen darin überein, dass wir es mit einem neuen Pathotyp zu tun haben. Er könnte aus einem EAEC-Stamm durch Einbau der Gene für die Produktion des Shigatoxins 2 entstanden sein (siehe oben). Ihn nicht mehr als EHEC, sondern als EAHEC zu bezeichnen, ist daher gerechtfertigt. Um es noch einmal zusammenzufassen: Die wichtigsten Pathogenitätsfaktoren sind beim EHEC Stx2 (Toxin) und LEE (zum Festhalten), beim EAHEC Stx2 und AAF (zum Aggregieren). Die besondere Aggressivität von EAHEC erklärt sich dann wohl dadurch, dass durch das Aggregieren größere Zellmengen im Darm heranwachsen, die dann entsprechend mehr Shigatoxin produzieren.

Epilog

In seinem Roman *Die Pest* schrieb Albert Camus: »Denn er wusste, was dieser Menge im Freudentaumel unbekannt war und was man in Büchern lesen kann, dass nämlich der Pestbacillus nie stirbt und nie verschwindet, dass er jahrelang in den Möbeln und in der Wäsche schlummern kann, dass er in Zimmern, Kellern, Koffern, Taschentüchern und Papieren geduldig wartet und dass vielleicht der Tag kommen würde, an dem die Pest zum Unglück und zur Belehrung der Menschen ihre Ratten wecken und zum Sterben in eine glückliche Stadt schicken würde.«

Wir haben es heute weniger mit dem Pestbacillus zu tun als mit Verwandlungskünstlern wie ETEC, EHEC und EAHEC.

Dank

Der Autor dankt dem Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, insbesondere Herrn Dr. Gregor Cicchetti, für die Erlaubnis, den Teil »EHEC« aus dem Buch »Bakterien rüsten auf« zu übernehmen. Er dankt dem Institut für Mikrobiologie und Genetik der Georg-August-Universität für fortwährende Kooperation und Frau Dr. Almut Popp vom XLAB, Göttinger Experimentallabor für junge Leute, für die Druckvorbereitung dieses Beitrags.

Literatur

- [1] Gottschalk G.: Welt der Bakterien – die unsichtbaren Beherrscher unseres Planeten, Wiley-VCH, Weinheim 2009.
- [2] Hacker J.: Menschen, Seuchen und Mikroben. Infektionen und ihre Erreger. C.H. Beck, München 2003.
- [3] Lawrence J.G., Ochman H. (1997) Molecular archaeology of the *Escherichia coli* genome. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 95, S. 9413-9417.
- [4] Elsinghorst E.A.: Enterotoxigenic *Escherichia coli*. In: Donnenberg M.S.: *Escherichia coli*, Virulence mechanisms of a versatile pathogen. Academic Press, Amsterdam 2000. In dem Band gibt es weitere Artikel über EHEC, EPEC und UPEC.
- [5] Thorpe Ch.M. *et al.*: Enterohaemorrhagic and other shigatoxin-producing *Escherichia coli*. In: Donnenberg, M.S., Amsterdam 2000.
- [6] Hayashi *et al.* (2001) Complete genome sequence of enterohaemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 and genomic comparison with a laboratory strain K-12. DNA Research 8, S. 11-22.
- [7] Wikipedia: The 2006 North American *E. coli* outbreak.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Infektiologie e.V.: EHEC Infection and antibiotic therapy. Mitteilung vom 4. Juni 2011.
- [9] Robert Koch-Institut: Epidemiologisches Bulletin 31/2011.
- [10] European Centre for Disease Control: Epidemiological update, 27. Juli 2011. Frank C. *et al.* (2011) Epidemic Profile of Shigatoxin-producing *Escherichia coli* O104:H4 outbreak in Germany. The New England Journal of Medicine 365 (19), S. 1771-1780.
- [11] Bielaszewska M. *et al.* (2011) Characterization of the *Escherichia coli* strain associated with an outbreak of hemolytic-uraemic syndrome in Germany, 2011: a microbiological study. The Lancet Infectious Diseases 11 (9), S. 671-676.
- [12] Pressemitteilungen der erwähnten Krankenhäuser.
- [13] Brzuszkiewicz E. *et al.*: Genome sequence analyses of two isolates from the recent *Escherichia coli* outbreak in Germany reveal the emergence

- of a new pathotype: Entero-Aggregative-Haemorrhagic *Escherichia coli* (EAHEC). Archives of Microbiology 193 (12), S. 883-891.
- [14] Mellmann A. *et al.* (2011) Prospective Genomic Characterization of the German Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O104:H4 Outbreak by Rapid Next Generation Sequencing Technology. PLOS ONE 6 (7): e22751.
 - [15] Rohde H. *et al.* (2011) Open-source genomic analysis of Shiga-toxin-producing *E. coli* O104:H4. The New England Journal of Medicine 365, S. 718-724.
 - [16] Schlegel H.G.: Geschichte der Mikrobiologie. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, 2004.

Gerd Gigerenzer

Bauchentscheidungen

Die Intelligenz des Unbewussten¹

Intelligenz stellen wir uns als eine überlegte, bewusste Tätigkeit vor, die von den Gesetzen der Logik bestimmt wird. Doch ein Großteil unseres geistigen Lebens vollzieht sich unbewusst und beruht auf Prozessen, die nichts mit Logik zu tun haben: Bauchgefühle oder Intuitionen. Wir haben Intuitionen über Sport, Freunde, die richtige Zahnpasta und andere gefährliche Dinge. Wir verlieben uns und spüren, dass der DAX steigen wird. Woher kommen diese Gefühle? Woher wissen wir es?

Können unsere Bauchgefühle zu besseren Entscheidungen führen? Diese Annahme erscheint naiv, sogar absurd. Seit Jahrzehnten predigen uns Bücher über rationale Entscheidung und Unternehmensberater Weisheiten wie: »Erst wägen, dann wagen« oder »Erst denken, dann handeln.« Seien Sie aufmerksam. Gehen Sie überlegt, besonnen und analytisch vor. Berücksichtigen Sie alle Alternativen, schreiben Sie alle Gründe pro und kontra auf und wägen Sie deren Nutzen und Wahrscheinlichkeiten ab, am besten mithilfe eines teuren statistischen Softwarepakets. Allerdings beschreibt dieses Schema nicht, wie wirkliche Menschen denken – einschließlich der Autoren dieser Bücher. Ein Professor der *Columbia University* in New York überlegte hin und her, ob er das Angebot einer anderen Universität annehmen sollte. Schließlich nahm ihn ein Kollege beiseite und riet ihm: »Maximiere doch einfach deinen erwarteten Nutzen – du schreibst doch immer darüber.« Darauf entgegnete der Professor entnervt: »Hör auf damit – das ist jetzt ernst!«

Ob Wirtschaftswissenschaftler, Psychologe oder Otto Normalverbraucher – die meisten räumen gern ein, dass das Ideal eines perfekten Menschen mit grenzenlosem Wissen und unbeschränkter Zeit unrealistisch sei. Andererseits sind sie aber überzeugt davon, dass wir ohne

1 Auszüge aus: Gerd Gigerenzer: Bauchentscheidungen. Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. München 2007 (engl. NY 2007). Copyright C. Bertelsmann Verlag, genehmigter Wiederabdruck.

diese Einschränkungen und mit mehr Logik bessere Entscheidungen treffen würden, dass wir vielleicht nicht jeden Aspekt berücksichtigen, es aber nach Möglichkeit tun sollten. Dieser Ansicht werden Sie auf den folgenden Seiten nicht begegnen. Meine Ausführungen zeigen, wie sich die Intelligenz anpasst und mit ihren Mitteln haushaltet, indem sie sich auf das Unbewusste, auf Faustregeln und auf evolvierte Fähigkeiten verlässt. Damit entpuppen sich ihre vermeintlichen Beschränkungen in Wahrheit als Stärke.

Ein nützliches Maß an Unwissenheit

Stellen Sie sich vor, Sie nehmen an einer Gameshow im Fernsehen teil. Sie haben alle Mitbewerber aus dem Feld geschlagen und erwarten nun bebend die Eine-Million-Euro-Frage. Hier ist sie: Welche Stadt hat mehr Einwohner, Detroit oder Milwaukee?

Mist, Geografie ist nie Ihre Stärke gewesen! Die Zeit läuft erbarungslos ab. Abgesehen von ein paar absonderlichen Trivial-Pursuit-Junkies dürften nur wenige Menschen die Antwort kennen. Es gibt keine Möglichkeit, die richtige Lösung logisch abzuleiten; Sie müssen auf der Grundlage dessen, was Sie wissen, eine Vermutung äußern. Vielleicht erinnern Sie sich, dass Detroit eine Industriestadt ist, der Geburtsort von Motown und der amerikanischen Automobilindustrie. Doch auch Milwaukee ist eine Industriestadt, bekannt für ihre Brauereien, und vielleicht erinnern Sie sich auch an den Song von Ella Fitzgerald, in dem sie von ihrer Cousine mit der quäkenden Stimme erzählt. Was können Sie daraus schließen?

Daniel Goldstein und ich stellten diese Frage in einem amerikanischen College-Kurs, und die Studenten waren geteilter Meinung – rund 40 Prozent entschieden sich für Milwaukee, die anderen für Detroit. Anschließend testeten wir eine entsprechende Gruppe von deutschen Studenten. Praktisch alle gaben die richtige Antwort: Detroit. Man könnte daraus schließen, die Deutschen seien schlauer oder wüssten zumindest besser in amerikanischer Geografie Bescheid. Doch das Gegenteil ist der Fall. Sie wussten sehr wenig über Detroit, und viele von ihnen hatten sogar noch nie etwas von Milwaukee gehört. Daher mussten sich die deutschen Studenten auf ihre Intuition anstatt auf gute Gründe verlassen. Worin liegt das Geheimnis dieser verblüffenden Intuition?

Die Antwort ist überraschend einfach. Die Deutschen verwendeten eine Faustregel, die als Rekognitionsheuristik bezeichnet wird:²

Wenn du den Namen der einen Stadt, aber nicht den der anderen erkennst, dann schließe daraus, dass die wiedererkannte Stadt mehr Einwohner hat.

Die amerikanischen Studenten konnten diese Faustregel nicht benutzen, weil sie schon von beiden Städten gehört hatten. Sie wussten zu viel. Die vielen Fakten trübten ihr Urteil und hinderten sie daran, die richtige Antwort zu finden. Ein gewisses Maß an Unwissenheit kann also durchaus von Wert sein. Natürlich ist, wer sich auf das Wiedererkennen von Namen verlässt, auch nicht gegen Fehler gefeit. Beispielsweise werden japanische Touristen mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf schließen, dass Heidelberg größer als Bielefeld ist, weil sie von letzterer Stadt noch nie etwas gehört haben. Trotzdem verhilft uns diese Regel in den meisten Fällen zu der richtigen Antwort, und zwar besser als selbst ein beträchtliches Wissen.

Die Rekognitionsheuristik kann uns nicht nur dabei helfen, eine Million Euro zu gewinnen. So wenden wir sie gewöhnlich auch dann an, wenn wir Produkte kaufen, deren Markennamen wir erkennen. Diese Heuristiken oder Faustregeln von Verbrauchern machen sich Unternehmen zunutze, indem sie wenig informative Werbekampagnen finanzieren, die nur einen einzigen Zweck haben: den Wiedererkennungswert eines Markennamens zu erhöhen. Der Instinkt, sich an das zu halten, was man kennt, hat in freier Natur Überlebenswert. Wenn Sie sich an vertraute Nahrungsmittel halten, bekommen Sie die erforderlichen Kalorien, ohne Zeit zu verschwenden und ohne Ihr Schicksal herauszufordern. Den umgangssprachlichen Ausdruck Faustregel ver-

- 2 Lit. Goldstein und Gigerenzer (2002). Der Begriff Heuristik kommt aus dem Griechischen und bedeutet »Was dazu dient, zu finden oder zu entdecken«. Der Mathematiker George Pólya (1954) von der *Stanford University* unterschied zwischen heuristischem und analytischem Denken. Beispielsweise ist heuristisches Denken unentbehrlich für das Finden eines mathematischen Beweises, während analytisches Denken erforderlich ist, um die Schritte eines Beweises zu begründen. Pólya machte Herbert A. Simon, auf dessen Arbeit ich mich stütze, mit der Heuristik vertraut. Unabhängig davon vertraten Kahneman *et al.* (1982) die Auffassung, dass wir Heuristiken verwenden, wenn wir Urteile fällen, konzentrierten sich allerdings auf Fehler im Denken.

wende ich synonym mit dem wissenschaftlichen Terminus Heuristik. Eine Faustregel unterscheidet sich grundlegend von einer Bilanzmethode mit Pro und Kontra; sie versucht, die wichtigste Information herauszugreifen, und lässt den Rest außer Acht. Die Intelligenz des Unbewussten liegt darin, dass es, ohne zu denken, weiß, welche Regel in welcher Situation vermutlich funktioniert.

Evolvierte Fähigkeiten

Wenn die Informationen nicht ausreichen, denkt sich das Gehirn etwas aus, das auf Annahmen über die Welt beruht. Um zu verstehen, wie unser Wahrnehmungssystem Dinge »erfindet«, betrachten Sie die Punkte auf der linken Seite der Abbildung 1. Sie erscheinen konkav, d.h. sie sind offenbar wie kleine Vertiefungen in die Oberfläche eingekerbt. Die Punkte auf der rechten Seite dagegen erscheinen konvex, d.h. sie wölben sich aus der Oberfläche heraus, dem Betrachter entgegen. Wenn Sie das Buch auf den Kopf stellen, verwandeln sich die konkaven Punkte in konvexe und umgekehrt. Warum sehen wir die Punkte auf die eine oder auf die andere Weise?

Die Antwort lautet, dass das Auge nicht genügend Informationen hat, um zweifelsfrei zu erkennen, was dort draußen ist. Doch unser Gehirn lässt sich von der Ungewissheit nicht lähmen. Es schließt eine »Wette« ab, ausgehend von der Struktur der Umwelt – oder von dem, was das Gehirn für die Struktur hält. Eine dreidimensionale Welt voraussetzend, mutmaßt es anhand der schattierten Teile der Punkte, in welche Richtung der dritten Dimension sie sich erstrecken. Um eine plausible Vermutung anzustellen, nimmt es an, dass 1. das Licht von oben kommt und 2. es nur eine Lichtquelle gibt.

Diese beiden Strukturen sind charakteristisch für die Stammesgeschichte des Menschen (und der Säugetiere), in deren Verlauf Sonne und Mond lange die einzigen Lichtquellen waren. Die erste Annahme gilt weitgehend auch heute noch für das künstliche Licht, dessen Quellen sich meist über uns befinden, obwohl es auch Ausnahmen wie etwa Autoscheinwerfer gibt. Das Gehirn geht über die wenigen Informationen hinaus, die es besitzt, und verlässt sich auf eine einfache Faustregel, die diesen vermuteten Strukturen angepasst ist:

Befindet sich der Schatten im oberen Teil, sind die Punkte in die Oberfläche eingekerbt; befindet sich der Schatten im unteren Teil, wölben sich die Punkte aus der Oberfläche heraus.

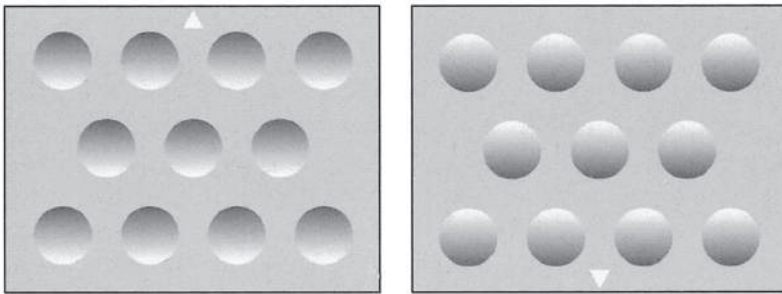


Abbildung 1: Unbewusste Schlüsse. Das Gehirn schließt automatisch, dass sich die Punkte auf der linken Seite des Bildes nach innen, also vom Betrachter fort, krümmen, und dass diejenigen auf der rechten Seite nach außen, also auf den Beobachter zu, gewölbt sind. Wenn Sie das Buch auf den Kopf stellen, wölben sich die nach innen gekrümmten Punkte nach außen und umgekehrt.

Betrachten Sie die Punkte auf der rechten Seite. Sie sind im oberen Teil hell und im unteren schattiert. Daher besagt der unbewusste Schluss des Gehirns, dass sich die Punkte dem Beobachter entgegenwölben, da das Licht den oberen Teil trifft, den unteren aber nur in geringerem Maße. Dagegen sind die Punkte auf der linken Seite im oberen Teil schattiert und im unteren hell; aus denselben Gründen setzt das Gehirn nun darauf, dass sie nach innen gekrümmt sind. Diese Annahmen sind im Allgemeinen jedoch nicht bewusst, weshalb der große deutsche Physiologe Hermann von Helmholtz von »unbewussten Schlüssen« sprach.³ Von vorhandenem Wissen über die Welt ausgehend, verknüpfen unbewusste Schlüsse Sinnesdaten miteinander. Es ist umstritten, ob sie individuell gelernt werden, wie Helmholtz und der Wiener Psychologe Egon Brunswik meinten, oder durch evolutionäres Lernen erworben werden, wie der Stanford-Psychologe Roger Shepard und andere behauptet haben.

Diese unbewussten Wahrnehmungsschlüsse sind überzeugend genug, um als Handlungsgrundlage zu dienen, aber im Unterschied zu anderen intuitiven Urteilen nicht flexibel. Automatisch werden sie durch äußere Reize ausgelöst. Ein automatischer Prozess kann nicht

3 Lit. von Helmholtz (1856-1866/2003). In einer Reihe faszinierender Experimente haben Kleffner und Ramachandran (1992) eingehend untersucht, wie Form aus Schattierung geschlossen wird. Bargh (1989) lieferte eine ausgezeichnete Diskussion automatischer Prozesse im Allgemeinen.

durch Einsicht oder prozessfremde Information verändert werden. Selbst jetzt, wo wir wissen, wie die intuitive Wahrnehmung arbeitet, können wir nicht ändern, was wir sehen. Und weiterhin nehmen wir konkave Punkte wahr und wie sie sich verändern, sobald wir das Buch umgekehrt herum halten. Ich glaube, dass intuitive Urteile so ähnlich zustande kommen wie diese Wahrnehmungsvermutungen. Der Unterschied liegt darin, dass die Intuition flexibler ist als die Wahrnehmung. Der Mensch hieße nicht *Homo sapiens*, wenn alle seine Schlussfolgerungen Reflexcharakter hätten. Es gibt Faustregeln, die alle Vorteile der Wahrnehmungsvermutungen aufweisen – sie sind schnell, einfach und an ihre Umwelt angepasst –, aber ihre Anwendung ist nicht vollkommen automatisch. Obwohl gewöhnlich unbewusst, können sie bewusster Intervention unterworfen werden.

Evolvierte Fähigkeiten – unter anderem Sprache, Wiedererkennungsgedächtnis, Verfolgen von Objekten mit den Augen, Nachahmung und Emotionen wie Liebe – werden durch natürliche Selektion, kulturelle Vermittlung und andere Mechanismen erworben. Die Fähigkeit zur Sprache oder zur Nachahmung hat sich beispielsweise durch natürliche Selektion entwickelt, doch das Wissen, welche Wörter welche Objekte bezeichnen, ist eine Frage des kulturellen Lernens. Ich verwende den Ausdruck evolvierte Fähigkeiten im allgemeinen Sinn, da Fähigkeiten des Gehirns immer sowohl von unseren Genen als auch von unserer Lernumgebung abhängen. Stammesgeschichtlich entwickelten sie sich parallel zur Umwelt, in der unsere Vorfahren lebten, und individuell werden sie durch die Umgebung geprägt, in der ein Kind aufwächst. So ist etwa die menschliche Fähigkeit, das Verhalten anderer nachzuahmen, eine Voraussetzung für die Entwicklung von Kultur. Einer von Darwins seltenen Irrtümern war seine Überzeugung, die Fähigkeit zur Nachahmung sei eine häufig auftretende Anpassungsleistung vieler Tierarten.⁴ Bei keiner anderen Art ahmen die Individuen so allgemein, sorgfältig und spontan nach wie beim Menschen – eine Voraussetzung für die kumulative Entfaltung jenes Bestands an Fertigkeiten und Wissen, den wir Kultur nennen. Der Psychologe Michael Tomasello und seine Kollegen haben Experimente durchgeführt, bei denen jugendliche und erwachsene Schimpansen sowie zweijährige Kinder erwachsene Menschen beobachteten, wie sie ein hakenartiges Werkzeug verwen-

4 Lit. Richerson und Boyd (2005, S. 100). Diese Autoren bieten eine sehr empfehlenswerte Einführung zur Rolle der Nachahmung beim kulturellen Lernen.

deten, um sich Nahrung zu verschaffen, die außerhalb ihrer Reichweite lag.⁵ »Die Schimpansen lernten, dass sich das Werkzeug irgendwie verwenden ließ, achteten aber nicht weiter auf die Einzelheiten seiner Anwendungsweise, während die Kinder alle Details mit großer Aufmerksamkeit beobachteten und sie getreulich nachahmten. Ein Kind mag schwächer und langsamer sein als ein Schimpanse, aber es erlernt schneller Kultur – in diesem Fall durch Nachahmung. Doch wenn wir uns auf die Nachahmung allein verließen, würde unser Verhalten von der Umwelt abgekoppelt. Flexible Faustregeln wie die folgende erlauben uns, Nachahmung gezielt einzusetzen.

Ahme nach, wenn sich die Welt nur langsam verändert, ansonsten lerne aus der eigenen Erfahrung oder ahme jene nach, die klüger sind als du und sich rascher der neuen Situation angepasst haben.

Fähigkeiten bauen aufeinander auf. Die Fähigkeit, Objekte mit den Augen gezielt zu verfolgen, beruht auf den physischen und geistigen Mechanismen, die zur Orientierung in der eigenen Umwelt beitragen. Die Fähigkeit, andere zu beobachten und daraus zu lernen, stützt sich ihrerseits auf die Fähigkeit, Menschen in Zeit und Raum mit den Augen zu folgen. Die Fähigkeit zur Kooperation und zur Nachahmung erwächst wiederum aus der Fähigkeit, andere zu beobachten. Wenn Individuen die Fähigkeit zur Kooperation haben, etwa um Waren auszutauschen, müssen sie auch eine Antenne für Täuschungsmanöver entwickeln, um nicht ausgenutzt zu werden.⁶ Entsprechend ist das Wiedererkennungsgedächtnis eine Vorbedingung für Ansehen; Institutionen können nur Ansehen gewinnen, wenn die Menschen deren Namen erkennen und zumindest eine schwache Erinnerung daran haben, warum sie Achtung verdienen. Eine Institution mit einem guten Ruf weckt wiederum Vertrauen, verstärkt die Gruppenidentifikation und trägt zur Verbreitung der von ihr verkörperten Werte bei.

Intelligenz und Umwelt

Eine Ameise läuft rasch über einen Sandstrand, wobei sie einem Weg voller Windungen und Kurven folgt. Sie wendet sich nach rechts, nach

⁵ Lit. Tomasello (1996).

⁶ Lit. Cosmides und Tooby (1992).

links, zurück, hält inne und bewegt sich wieder vorwärts. Wie können wir die Komplexität des von ihr gewählten Wegs erklären? Wir können uns ein raffiniertes Programm im Gehirn der Ameise vorstellen, das eine Erklärung für ihr komplexes Verhalten liefert, doch wir werden feststellen, dass es nicht funktioniert. Was wir bei unseren Versuchen, über das Gehirn der Ameise zu spekulieren, übersehen haben, ist die Umwelt der Ameise. Die Beschaffenheit des von Wind und Wellen geformten Strandes, seine kleinen Hügel und Täler sowie seine Hindernisse bestimmen den Weg der Ameise. In der scheinbaren Komplexität ihres Verhaltens kommt die Komplexität ihrer Umwelt und weniger diejenige ihres Geistes zum Ausdruck. Möglicherweise befolgt die Ameise eine einfache Regel:

Sieh zu, dass du so schnell wie möglich aus der Sonne und zurück ins Nest kommst, ohne Energie zu verschwenden, indem du über Hindernisse wie Sandberge und Zweige kletterst.

Komplexes Verhalten setzt keine komplexen geistigen Strategien voraus. Der Nobelpreisträger Herbert A. Simon vertrat die Ansicht, Gleiches gelte für Menschen: »Ein Mensch, betrachtet als System mit bestimmtem Verhalten, ist recht einfach. Die scheinbare Komplexität seines Verhaltens in der Zeit spiegelt weitgehend die Komplexität der Umgebung wider, in der er sich befindet.«⁷ Nach seiner Ansicht passen sich Menschen ähnlich wie Gelatine an. Wenn Sie wissen möchten, wie diese nach der Verfestigung aussieht, müssen Sie sich die Gestalt der Gussform anschauen. Der Weg der Ameise illustriert eine wichtige Einsicht: Um Verhalten zu verstehen, müssen wir sowohl die Intelligenz als auch die Umwelt betrachten.

Eine hungrige Ratte läuft allein durch ein Gebilde, das Psychologen als T-Labyrinth bezeichnen (Abb. 2, links). Sie kann sich entweder nach links oder nach rechts wenden. Wenn sie nach links läuft, findet sie in acht von zehn Fällen Futter. Wendet sie sich nach rechts, stößt sie nur in zwei von zehn Fällen auf Futter. Die Futtermenge, die sie vorfindet,

7 Lit. Simon (1969/1994, S. 65). Herbert A. Simon war das Musterbeispiel eines wahrhaft interdisziplinären Denkers, der sich auf keine Schublade festlegen ließ – nicht auf die des Psychologen, des Wirtschaftswissenschaftlers, des Politikwissenschaftlers oder irgendeine andere –, und gilt als einer der Väter der Künstlichen Intelligenz und der Kognitionswissenschaft. Zur Beziehung zwischen Simon und meiner Arbeit siehe Gigerenzer (2004b).

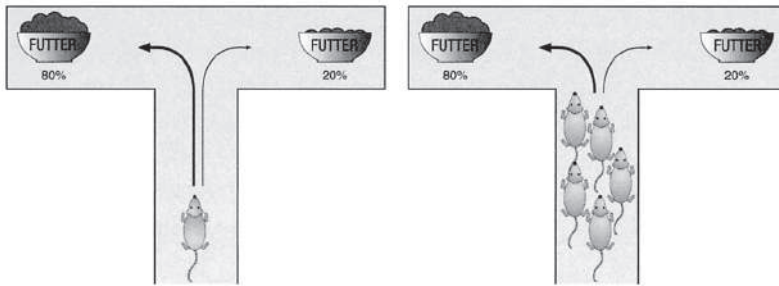


Abbildung 2: Was für den Einzelnen irrational erscheint, mag rational für die Gruppe sein. Ratten laufen durch ein T-Labyrinth. In 80 % der Fälle, in denen sie sich nach links, und in 20 % der Fälle, in denen sie sich nach rechts wenden, bekommen sie Futter. Eine einzelne Ratte müsste sich also immer nach links wenden, doch sie tut es oft nur in 80 % der Fälle, selbst wenn dies zur Folge hat, dass sie eine geringere Futtermenge erhält. Was irrational erscheint, ist durchaus sinnvoll, wenn viele Ratten um begrenzte Ressourcen konkurrieren: Würden sich alle nach links wenden, ginge ihnen die Nahrung verloren, die sich rechts befindet.

ist gering, daher läuft sie wieder und wieder durch das Labyrinth. Unter einer Vielzahl von Versuchsbedingungen orientieren sich die Ratten, wie zu erwarten, meistens nach links. Doch manchmal wenden sie sich auch nach rechts, obwohl das die schlechtere Möglichkeit ist, und verwirren damit manch einen Forscher. Nach dem logischen Prinzip der Maximierung müsste sich die Ratte immer nach links wenden, weil sie dort in 80 Prozent der Fälle Futter erwarten kann. Manchmal wenden sich die Ratten jedoch nur in rund 80 Prozent der Fälle dorthin und in den übrigen 20 Prozent nach rechts. Man bezeichnet ihr Verhalten dann als *Probability Matching* (Wahrscheinlichkeitsangleichung), weil es die Wahrscheinlichkeiten von 80 und 20 Prozent widerspiegelt. Im Endeffekt erhält das Tier jedoch eine geringere Futtermenge, denn die Erwartung beträgt nur 68 Prozent.⁸ Das Verhalten der Ratte erscheint

8 Dieser Wert ergibt sich aus $0,8 \times 0,8 + 0,2 \times 0,2 = 0,68$. Das heißt, die Ratte wendet sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,8 nach links und erhält in diesem Fall Futter mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,8. Sie wendet sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,2 nach rechts und erhält Futter mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,2. Zum *Probability Matching* siehe Brunswik (1939) und Gallistel (1990).

irrational. Hat die Evolution das Gehirn des armen Tiers falsch verdrahtet? Oder sind Ratten einfach dumm? Wir können das Verhalten der Ratte besser verstehen, wenn wir auf ihre Umwelt blicken statt in ihr kleines Gehirn. Unter den natürlichen Bedingungen der Futtersuche konkurriert eine Ratte mit vielen anderen Ratten und Tieren um Nahrung (Abb. 2, rechts). Wenn alle die Stelle mit der meisten Nahrung aufsuchen, bekommen sie nur einen kleinen Anteil. Das eine abweichende Individuum, das manchmal nur den zweitbesten Weg wählt, müsste sich gegen viel weniger Konkurrenten durchsetzen, würde mehr Nahrung erhalten und somit durch die natürliche Selektion begünstigt. Daher verlassen sich Ratten offenbar auf eine Strategie, die in einer kompetitiven Umwelt angebracht ist, aber nicht in die Experimentalsituation passt, in der ein Individuum in sozialer Isolation gehalten wird. In den Geschichten von der Ameise und der Ratte geht es um dasselbe Problem. Um Verhalten zu verstehen, genügt es nicht, nur in den Kopf zu schauen. Man muss auch die materielle und soziale Umwelt berücksichtigen.

Die Wechselwirkung zwischen Intelligenz und Umwelt lässt sich in einem sinnfälligen Vergleich von Herbert A. Simon ausdrücken. Im Motto zu diesem Kapitel werden Intelligenz und Umwelt mit den Klängen einer Schere verglichen. Wie sich die Funktion der Schere nicht verstehen lässt, wenn man nur eine Klinge betrachtet, kann man menschliches Verhalten nicht verstehen, indem man entweder nur die Kognition oder nur die Umwelt betrachtet. Das mag trivial erscheinen, doch haben sich viele Psychologen für einen mentalistischen Weg entschieden, indem sie versuchen, menschliches Verhalten durch Einstellungen, Präferenzen, Logik oder bildgebende Verfahren in der Hirnforschung zu erklären, und dabei die Struktur der Umwelt vernachlässigen, in der die Menschen leben.

Werfen wir einen genaueren Blick auf eine wichtige Struktur der Umwelt: das Ausmaß an Ungewissheit, mit dem überraschende, neue und unerwartete Dinge geschehen. Wir können die Zukunft nicht vollständig vorhersagen, gewöhnlich nicht einmal annähernd. Fast täglich höre ich im Radio ein Interview, in dem irgendein prominenter Finanzexperte gefragt wird, warum am Vortag bestimmte Aktien gestiegen und andere gefallen sind. Stets finden die Experten eine detaillierte, plausible Erklärung. Kaum jemals fordert der Interviewer den Experten auf, vorherzusagen, welche Aktien am folgenden Tag steigen werden. Rückschau ist einfach, Vorausschau schwierig. In der Rückschau hat

sich jede Ungewissheit verflüchtigt. Wir wissen, was geschehen ist, und mit ein bisschen Fantasie können wir immer eine Erklärung finden. Bei der Vorausschau, der Prognose, müssen wir uns jedoch der Ungewissheit stellen. Der Aktienmarkt ist ein extremes Beispiel für eine ungewisse Umwelt mit einer Vorhersagbarkeit auf oder nahe dem Zufallsniveau. Der Umstand, dass Finanzexperten beim Börsenspiel der Zeitschrift *Capital* so schlecht abgeschnitten haben, war kein Einzelfall. Kürzlich wurden in einer Stockholmer Studie Portfolio-Manager, Analysten, Börsenmakler und Investmentberater aufgefordert, die Wertentwicklung von zwanzig Blue-Chip-Aktien vorherzusagen. Jedem Teilnehmer wurden immer zwei Aktien gleichzeitig genannt, und er sollte vorhersagen, welche sich besser entwickeln würde. Die gleiche Aufgabe erhielt eine Gruppe von Laien, deren Vorhersagen sich in 50 Prozent der Fälle als richtig erwiesen. Das heißt, die Vorhersagen der Laien bewegten sich, wie nicht anders zu erwarten, auf Zufallsniveau, nicht besser und nicht schlechter. Wie gut schnitten die Profis ab? Sie entschieden sich nur in 40 Prozent der Fälle für die richtige Aktie. Das gleiche Ergebnis wurde in einer zweiten Untersuchung mit einer anderen Expertengruppe erzielt.⁹ Wie ist es möglich, dass die Vorhersagen der Finanzexperten konsequent unter dem Zufallsniveau lagen? Experten stützen sich bei ihren Prognosen auf komplexe Informationen über jede Aktie, und der hohe Konkurrenzdruck veranlasst sie zu Vorhersagen, die sich von einem Experten zum anderen erheblich voneinander unterscheiden. Da nicht jeder recht haben kann, drückt diese hohe Variabilität die Gesamtleistung unter das Zufallsniveau.

Nicht alles ist so unberechenbar wie der Aktienmarkt, doch vieles ist durch eine beträchtliche Unvorhersagbarkeit gekennzeichnet. Praktisch niemand sagte den Fall der Berliner Mauer voraus, weder Politikwissenschaftler noch die Bevölkerung von West- und Ostberlin. Experten wurden 1989 vom Erdbeben in Kalifornien ebenso überrascht wie von der Bevölkerungsexplosion durch den Babyboom und von der Entwicklung des Personalcomputers. Vielen Menschen scheint nicht klar zu sein, wie begrenzt die Vorhersagbarkeit unserer Welt ist, daher geben Einzelpersonen und Firmen riesige Summen für Berater aus. Jahr für Jahr streicht die Prognoseindustrie – Weltbank, Wertpapiermakler, Technologieberater, Unternehmensberater und viele andere mehr – trotz ihrer dürftigen Trefferquote rund 200 Milliarden Dollar für zu-

9 Lit. Törngren und Montgomery (2004).

meist Wahrsagerei ein. Die Zukunft vorherzusagen, ist für Laien, Experten und Politiker gleichermaßen schwierig. Winston Churchill hat einmal beklagt, dass die Zukunft ein verfluchtes Ärgernis nach dem anderen sei.¹⁰ Nach allgemeiner Überzeugung muss man bei der Vorhersage der Zukunft so viel Information wie möglich verwenden und sie in denkbar leistungsfähige Computer einspeisen. Ein komplexes Problem verlangte eine komplexe Lösung, wird uns gesagt. Tatsächlich trifft in schwer vorhersagbaren Situationen eher das Gegenteil zu.

Schulabbrecher

Martin Braun ist der Vater von zwei Halbwüchsigen. Er zieht zwei Gymnasien für seinen jüngeren Sohn in Betracht: die Kant-Schule und die Marx-Schule. Tief besorgt, weil sein älterer Sohn die Schule abgebrochen hat, sucht Herr Braun nach einer Schule mit geringer Schulabbrecherquote. Doch keine der Schulen gibt der Öffentlichkeit verlässliche Zahlen über diese Quote preis. Daher sammelt Herr Braun Informationen, die ihm Rückschlüsse auf künftige Abbrecherquoten ermöglichen – Daten über Fehlzeiten, Rechtschreibleistungen, Klassengröße und durchschnittliche Noten in Mathematik. Aus der Erfahrung mit anderen Schulen hat er eine gewisse Vorstellung davon, welche dieser Daten ihm wichtige Anhaltspunkte liefern können. Irgendwann sagt ihm seine Intuition, dass die Kant-Schule die bessere Wahl sei. Herr Braun gibt viel auf seine Intuition und schickt seinen jüngeren Sohn auf die Kant-Schule.

Wie wahrscheinlich ist es, dass Herr Brauns Intuition richtig ist? Um diese Frage zu beantworten, gilt es zunächst, die Faustregel zu verstehen, die zu seinem intuitiven Gefühl geführt hat, und dann zu analysieren, in welcher Situation diese Regel funktioniert. Zahlreiche psychologische Experimente lassen darauf schließen, dass sich Menschen bei ihren intuitiven Urteilen oft auf einen einzigen guten Grund verlassen.¹¹ Die *Take-the-Best*-Heuristik erklärt, wie ein Bauchgefühl aus einem einzigen guten Grund entsteht. Nehmen wir an, Herr Braun

¹⁰ Lit. Sherden (1998, S. 7).

¹¹ Lit. Bröder (2003); Bröder und Schiffer (2003); Rieskamp und Hoffrage (1999).

verließe sich wie viele andere Menschen auf diese Heuristik. Dazu braucht er nur – ausgehend von seiner Erfahrung mit anderen Schulen – ein Gefühl dafür, welche Gründe besser sind als andere (wobei diese Rangfolge nicht perfekt sein muss). Nehmen wir an, dass die besten Anhaltspunkte Fehlzeiten, Rechtschreibleistung und die Klassengröße sind, in dieser Reihenfolge. Die Heuristik arbeitet diese Punkte nacheinander ab und stuft ihren jeweiligen Wert als hoch oder niedrig ein. Wenn der erste Punkt, die Fehlzeiten, eine Entscheidung ermöglicht, tritt die Stopppregel in Kraft, und alle weitere Information wird außer Acht gelassen. Wenn nicht, wird der zweite Punkt überprüft und so fort. Es folgt ein konkretes Beispiel:

	Marx-Schule	Kant-Schule
Fehlzeiten	hoch	hoch
Rechtschreibung	niedrig	hoch

Stopp und wähle die Kant-Schule.

Der erste Anhaltspunkt, die Fehlzeiten, führt zu keinem eindeutigen Ergebnis, daher wird die Rechtschreibleistung herangezogen – und sie erweist sich als eindeutig. Die Suche wird beendet, und es wird der Schluss gezogen, dass die Kant-Schule die geringere Abbrecherquote hat.

Doch wie verlässlich ist eine Intuition, die sich auf diese Faustregel stützt? Hätte Herr Braun bessere Aussichten gehabt, die richtige Schule auszusuchen, wenn er mehr Gründe herangezogen und sie nach Franklins¹² Bilanzmethode abgewogen und kombiniert hätte? Ich glaube, wir können mit Fug und Recht sagen, dass vor 1996, bevor meine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut die Leistungsfähigkeit jener intuitiven Regel entdeckte, fast jeder diese Frage mit Ja beantwortet hätte.¹³ Hier ist die Geschichte in Kurzform: Da die Gründe für den Schulabbruch regional unterschiedlich sein können und das Problem in

12 Lit. Franklin (1779). Der Naturforscher und Staatsmann Benjamin Franklin war einer der bedeutendsten Vertreter der Aufklärung. Seine moralische Algebra war eine frühe Spielart des modernen Utilitarismus und der rationalen Entscheidungstheorie. In seiner Ethik sind der Wüstling und der Trunkenbold ganz normale Menschen, die nur deshalb zu dem wurden, was sie sind, weil sie sozusagen ihre moralischen Rechenaufgaben falsch lösten.

13 Lit. Gigerenzer und Goldstein (1996); Gigerenzer et al. (1999).

den USA besonders groß ist, möchte ich mich auf eine US-amerikanische Großstadt konzentrieren: Chicago. Um die Frage zu überprüfen, ob mehrere Gründe besser seien als ein einziger guter Grund, sammelten wir an siebenundfünfzig Schulen Informationen über achtzehn Gründe für Abbrecherquoten, etwa den Anteil von Schülern aus Familien mit niedrigem Einkommen, von Schülern mit begrenzten Englischkenntnissen, von Schülern hispanischer Herkunft und von schwarzen Schülern, Ergebnisse des Schulleistungstests (SAT), Durchschnittseinkommen der Lehrkräfte, Elternmitwirkung, Fehlzeiten, Klassengröße, Rechtschreibleistung, Ergebnisse des Sozialkundetests und das Angebot von Englisch als Fremdsprache. Nun waren wir in der Lage, Herrn Brauns Problem systematisch zu analysieren. Wie können wir vorher sagen, welche der beiden Schulen eine höhere Abbrecherquote hat? Nach Franklins Regel müssten wir alle achtzehn Gründe berücksichtigen, jedem ein bestimmtes Gewicht zuweisen und dann eine Vorhersage treffen. Die moderne Spielart von Franklins Regel, mit schnellen Computern bequem berechenbar, heißt multiple Regression, wobei multipel für mehrere Gründe steht. Sie bestimmt die optimale Gewichtung jedes Grundes und summiert die Werte, wie Franklins Regel es verlangt, allerdings mithilfe komplexer Berechnungen. Unsere Frage lautete: Wie genau ist das einfache *Take-the-Best* im Vergleich zu dieser komplizierten Strategie? Um diese Frage zu beantworten, führten wir eine Computersimulation durch und gaben von der Hälfte der Schulen Informationen über die achtzehn Gründe und die tatsächlichen Abbrecherquoten ein.¹⁴ Aufgrund dieser Informationen schätzte die komplexe Methode ihre optimale Gewichtung und *Take-the-Best* eine gute Reihenfolge der Gründe. Dann testeten wir beide Strategien an der anderen Hälfte der Schulen, wobei nur die Gründe, aber nicht die Abbrecherquoten bekannt waren. Das wird in Abbildung 3 als Vorhersage bezeichnet und entspricht Herrn Brauns Situation, der die Abbrecherquoten von einigen Schulen kennt, aber nicht von den beiden, zwischen denen er sich entscheiden muss. Zur Kontrolle überprüften wir beide Strategien, als alle Informationen über alle Schulen vorlagen. Diese

14 Lit. Czerlinski *et al.* (1999). Dieses Verfahren bezeichnet man als Kreuzvalidierung. Wir wiederholten es tausendmal, um stabile Ergebnisse zu erhalten. Der Terminus für die andere, zurückschauende Aufgabe ist *Data Fitting* (Anpassung eines Modells an bereits bekannte Daten).

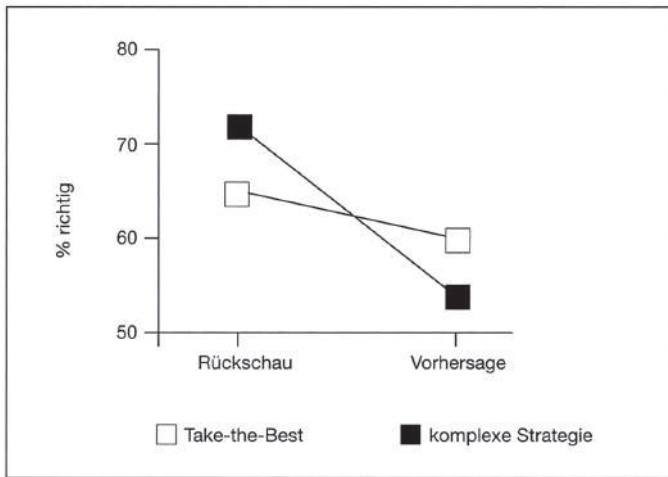


Abbildung 3: Intuitionen, die auf einfachen Faustregeln beruhen, können genauer sein als komplexe Berechnungen. Wie können wir vorhersagen, welche Schulen höhere Abbrecherquoten haben? Wenn die Informationen für alle Highschools bereits vorliegen (Rückschau), erzielt die komplexe Strategie, die multiple Regression, bessere Ergebnisse. Doch wenn wir Abbrecherquoten vorhersagen wollen, die noch nicht bekannt sind, ist die einfache Faustregel *Take-the-Best* genauer.

zweite Aufgabe verlangte also keine Vorhersage, sondern es ging nur darum, das bereits Bekannte im Nachhinein (aus der Rückschau) zu erklären. Wie sahen die Ergebnisse aus?

Die einfache *Take-the-Best*-Heuristik machte bessere Vorhersagen als die komplexe Strategie (Abb. 3) und brauchte dazu weniger Informationen. Im Durchschnitt prüfte sie nur drei Gründe, bevor die Stoppregel zur Anwendung kam, während die komplexe Strategie alle achtzehn gewichtete und summierte. Um zu erklären, was bereits über die Schulen bekannt war (Rückschau), war die komplexe Strategie besser. Doch wenn es darum ging, Vorhersagen über das zu machen, was noch nicht bekannt war, erwies sich das Verlassen auf einen einzigen guten Grund der Bezugnahme auf alle Gründe als überlegen. Wenn Herr Brauns Intuition dem *Take-the-Best*-Prinzip folgt, hat er bessere Aussichten, die richtige Wahl zu treffen, als wenn er alle verfügbaren Gründe mithilfe des elaborierten Computerprogramms sorgfältig ab-

wägt und summiert. Dieses Ergebnis vermittelt uns eine wichtige Erkenntnis: In einer ungewissen Welt müssen gute Intuitionen Information außer Acht lassen. Doch warum zahlte sich in diesem Fall aus, Information zu ignorieren? Abbrecherquoten sind außerordentlich schwer vorherzusagen – nur in 60 Prozent der Fälle konnte die bessere Strategie richtig vorhersagen, welche Schule die höhere Rate hatte. (Es sei darauf hingewiesen, dass 50 Prozent Zufallsniveau wären). Wie ein Finanzberater eine plausible Erklärung für die Aktienentwicklung von gestern liefern kann, ist die komplexe Strategie in der Lage, ihre vielen Gründe so zu gewichten, dass die resultierende Gleichung dem, was wir bereits wissen, in hohem Maße entspricht. Wie Abbildung 3 deutlich zeigt, kann eine komplexe Strategie in einer ungewissen Welt eben deshalb scheitern, weil sie zu viel in der Rückschau erklärt. Nur ein Teil der Information ist für die Zukunftsprognose relevant, und die Kunst der Intuition besteht darin, dass wir uns auf diesen Teil konzentrieren und den Rest außer Acht lassen. Eine einfache Regel, die sich lediglich auf den besten Anhaltspunkt verlässt, hat gute Aussichten, genau diese wichtige Information zu erwischen. Ob man nur eine einfache oder aber eine komplexe Strategie wählt, hat nicht nur persönliche Konsequenzen für besorgte Eltern wie Herrn Braun, sondern kann auch die Bildungspolitik beeinflussen. Nach der komplexen Strategie waren die besten Vorhersagefaktoren für eine hohe Abbrecherquote der Prozentsatz, den die Schule an hispanischen Schülern, an Schülern mit begrenzten Englischkenntnissen und an schwarzen Schülern aufwies. Im Gegensatz dazu stufte *Take-the-Best* Fehlzeiten ganz oben ein, dann kamen die Rechtschreibleistung und schließlich die Ergebnisse des Sozialkundetests. Von der komplexen Analyse ausgehend, könnte ein Politiker ein Programm propagieren, das dazu bestimmt wäre, Minderheiten bei der Integration zu helfen und das Fach Englisch als Fremdsprache zu intensivieren. Der einfachere und effektivere Ansatz legt jedoch nahe, dass ein Politiker besser beraten wäre, wenn er dafür sorgte, dass die Schüler regelmäßig am Unterricht teilnehmen und ihnen die Grundkenntnisse im Klassenzimmer besser vermittelt werden. Es geht also nicht nur um Genauigkeit, sondern auch um Politik.

Wann ist ein guter Grund besser als viele?

Die Vorstellung, dass Intuitionen, die auf *Take-the-Best* beruhen, ebenso genau sein könnten wie Methoden komplexer Entscheidungsfindung, ist offenbar schwer zu akzeptieren. Als ich die ersten Ergebnisse einem Forum von internationalen Fachleuten vorstellte, ließ ich sie schätzen, wie nahe *Take-the-Best* der Exaktheit einer modernen Version der Franklin'schen Regel (multiple Regression) käme. Nicht ein Einziger äußerte die Erwartung, die einfache Regel könnte ebenso genau, geschweige denn genauer sein, und die meisten vermuteten, *Take-the-Best* werde um 5 bis 10 Prozentpunkte oder mehr unterliegen. Zu ihrer Überraschung traf *Take-the-Best* in zwanzig Studien im Durchschnitt richtigere Entscheidungen. Inzwischen haben wir die Leistungsfähigkeit des einen guten Grundes in einer Reihe von realen Situationen unter Beweis gestellt.¹⁵

- 15 Als ich in einem Vortrag zum ersten Mal berichtete, dass ein guter Grund besser sei als Franklins Regel, stand ein namhafter Entscheidungsforscher auf und sagte: »Wenn Sie mich beeindrucken wollen, müssen Sie nachweisen, dass ein guter Grund es auch mit der multiplen Regressionsanalyse aufnehmen kann.« Wir nahmen die Herausforderung an und bewiesen zum ersten Mal, dass *Take-the-Best* auch diese Analyse übertreffen kann (Gigerenzer und Goldstein 1996, 1999). Wir veröffentlichten die Daten, so dass jeder die Tests wiederholen und die Behauptung überprüfen konnte. Viele, die ihren Augen nicht trauen wollten, bestätigten das ursprüngliche Resultat. Der nächste Einwand lautete, wir hätten das nur ein einziges Mal bewiesen. Daher erweiterten wir den Test auf insgesamt zwanzig reale Probleme aus Psychologie, Wirtschaft, Biologie, Soziologie, Gesundheitswesen und anderen Bereichen. Die multiple Regressionsanalyse schaffte im Durchschnitt 68 Prozent richtige Vorhersagen und *Take-the-Best* 71 Prozent. Als sich die Nachricht in der wissenschaftlichen Gemeinschaft verbreitete und andere Forscher die Ergebnisse unabhängig von uns bestätigten, vermuteten die Verteidiger des Mehr-ist-immer-besser-Prinzips den Fehler nicht mehr in den von uns verwendeten Problemen, sondern in der Art und Weise, wie wir die multiple Regression verwendeten. Einige Experten meinten, wir hätten andere Versionen dieser Methode durchrechnen müssen. Wir taten es und kamen im Prinzip zum gleichen Ergebnis (Czerlinski et al. 1999; Martignon und Laskey 1999). Schließlich konnten wir einige der Bedingungen beweisen, unter denen die komplexe Strategie nicht besser abschneiden kann als *Take-the-Best* (Martignon und Hoffrage 1999, 2002; Katsikopoulos und Martignon 2006). Das machte diesem Einwand ein Ende, aber nicht der Debatte. Plötzlich ging es nicht mehr um die multiple Regression, sondern um die Notwendigkeit, *Take-the-Best* mit hoch-

Diese Ergebnisse sind wichtig, weil sie zeigen, dass Intuitionen, die auf einem guten Grund beruhen, nicht nur ökonomisch, sondern oft auch außerordentlich zutreffend sind. Selbst wenn der Verstand eines Menschen in der Lage wäre, die modernsten und komplexesten KI-Strategien auszuführen, brächte er nicht immer bessere Resultate zustande. Das Fazit lautet: Wir sollten auf unsere Intuition vertrauen, wenn wir über Dinge nachdenken, die schwer vorausszusagen sind, und wenn wir wenig Information haben.

Wie vorhin erläutert, kann in einer ungewissen Welt eine komplexe Strategie eben deshalb scheitern, weil sie zu viel in der Rückschau erklärt. Nur ein Teil der Information ist für die Zukunft verwertbar. Eine einfache Regel, die sich auf den besten Grund beschränkt und den Rest vernachlässigt, hat gute Aussichten, die nützlichsten Informationen zu erfassen.

Stellen Sie sich ein Diagramm mit dreihundertfünfundsechzig Punkten vor, welche die Tagestemperaturen eines Jahres in New York wiedergeben. Im Januar sind die Werte niedrig, sie steigen im Frühjahr und Sommer an und gehen dann wieder zurück. Das Muster ist ziemlich zerklüftet. Mit entsprechender mathematischer Vorbildung können Sie eine komplexe Kurve finden, die sich den Punkten fast perfekt anpasst. Doch diese Kurve wird aller Wahrscheinlichkeit nach die Temperaturen des folgenden Jahres nicht besonders gut vorhersagen. Im Nachhinein ist eine gute Anpassung an sich nur von geringem Wert. Durch den Versuch, die perfekte Anpassung zu finden, bezieht man irrelevante Effekte ein, die sich nicht auf die Zukunft verallgemeinern lassen. Eine einfachere Kurve liefert bessere Vorhersagen für die Temperatur des folgenden Jahres, selbst wenn sie mit den vorliegenden Daten nicht so gut übereinstimmt. Abbildung 3 hat genau dieses Prinzip gezeigt. Die

komplexen, informationsfressenden Algorithmen aus der KI-Forschung (Künstliche Intelligenz) und dem Maschinellen lernen zu vergleichen. Abermals nahmen wir die Herausforderung an und gelangten zu dem Ergebnis, dass in vielen Situationen ein einziger guter Grund bessere Vorhersagen liefert als diese extrem komplexen Strategien (Brighton 2006). Zu den getesteten komplexen Strategien gehörten (1) konnektionistische Modelle: mit dem *Backpropagation*-Algorithmus trainierte neuronale Netze (*Feed-Forward*-Netze), (2) zwei klassische Entscheidungsbaum-Induktionsalgorithmen: Klassifikations- und Regressionsbäume (CART) und C4.5 sowie (3) *Exemplar Models: Nearest Neighbour Classifier* und Nosofskys Generalisiertes Kontext-Modell (GCM).

komplexere Strategie bewährt sich in der Rückschau besser, nicht jedoch bei Vorhersagen. Generell gilt: Intuitionen, die sich nur auf einen einzigen guten Grund stützen, sind in der Regel zutreffend, wenn es darum geht, die Zukunft vorherzusagen (oder einen unbekannten gegenwärtigen Zustand), diese Zukunft aber schwer vorhersehbar und die relevante Information beschränkt ist. Solche Intuitionen sind auch ökonomischer in der Verwendung von Zeit und Information. Eine komplexe Analyse dagegen zahlt sich aus, wenn es gilt, die Vergangenheit zu erklären, wenn die Zukunft in hohem Maße vorhersagbar ist oder wenn reichlich Information vorliegt.¹⁶

Warum gute Intuitionen nicht logisch sein müssen

Stellen Sie sich vor, Sie nehmen an einem psychologischen Experiment teil. Darin wird Ihnen die folgende Aufgabe gestellt:

Linda ist einunddreißig Jahre alt, ledig, sehr intelligent und sagt offen ihre Meinung. Im Hauptfach hat sie Philosophie studiert. Als Studentin hat sie sich für Fragen der Gleichberechtigung und der sozialen Gerechtigkeit engagiert, außerdem hat sie an Demonstrationen gegen Atomkraftwerke teilgenommen. Welche der beiden folgenden Alternativen ist wahrscheinlicher?

- Linda ist Bankangestellte.
- Linda ist Bankangestellte und in der Frauenbewegung aktiv.

Für welche entscheiden Sie sich? Wenn Ihre Intuitionen wie die der meisten Menschen funktionieren, wählen Sie die zweite Alternative. Allerdings vertreten Amos Tversky und der Nobelpreisträger Daniel

¹⁶ Das ist eine Zusammenfassung von einigen Ergebnissen der Analyse und Simulation, über die berichtet wird in: Gigerenzer, Todd *et al.* (1999); Katsikopoulos und Martignon (2006); Martignon und Hoffrage (2002), Hogarth und Karelaia (2005 a, b, 2006). Die Überschneidung der beiden Linien in Abbildung 3 illustriert das Problem des *Overfitting* (Überanpassung). Dieses Phänomen lässt sich folgendermaßen definieren: Nehmen wir zwei Zufallsstichproben einer Population (etwa die Temperaturmessungen zweier Jahre); das erste Jahr ist die Lernstichprobe und das folgende Jahr die Teststichprobe. Ein Modell A ist überangepasst an die Lernstichprobe, wenn es ein alternatives Modell gibt, das eine höhere Fehlerquote in der Lernstichprobe, aber eine geringere Fehlerquote in der Teststichprobe hat.

Kahneman die Auffassung, das sei die falsche Antwort, weil sie gegen die Gesetze der Logik verstoße. Eine Konjunktion zweier Ereignisse (Linda ist eine Bankangestellte und aktiv in der Frauenbewegung) kann nicht wahrscheinlicher sein als eines von ihnen allein (Linda ist eine Bankangestellte). Mit anderen Worten: Eine Teilmenge kann niemals größer als die Gesamtmenge sein. »Ob es Ihnen gefällt oder nicht, A kann nicht weniger wahrscheinlich sein als (A UND B), und der Glaube an das Gegenteil ist ein Fehlschluss.«¹⁷ Die Autoren bezeichneten diese Intuition, die den meisten Menschen gemeinsam ist, als Konjunktionsfehler (*conjunction fallacy*). Das Linda-Problem diente zum Beweis dafür, dass Menschen zutiefst unlogisch sind, und wurde auch bemüht, um verschiedene wirtschaftliche und menschliche Katastrophen zu erklären, unter anderem die US-amerikanische Sicherheitspolitik, Otto Normalverbrauchers Angst vor Kernkraftunfällen und seine übertriebenen Ausgaben für Versicherungen. Der Evolutionsbiologe Stephen J. Gould schrieb hierzu:¹⁸

Ich mag dieses Beispiel besonders, weil ich weiß, dass die [Konjunktion] am unwahrscheinlichsten ist, während ein kleiner Mann in meinem Ohr auf und ab hüpfte und mir einflüstert: »Aber sie kann nicht einfach nur Bankangestellte sein; lies doch mal die Beschreibung.« [...] Unser Verstand ist (aus welchem Grund auch immer) nicht darauf ausgelegt, nach den Wahrscheinlichkeitsregeln zu arbeiten.

Gould hätte lieber dem Bauchgefühl seines Homunkulus trauen sollen statt seinen bewussten Überlegungen. Wissenschaftler, die hier von einem Konjunktionsfehler ausgehen, glauben, dass die mathematische Logik die Richtschnur sei, um zu bestimmen, ob Urteile rational oder irrational sind. Beim Linda-Problem sind für die logische Definition des rationalen Denkens allein die Wörter »und« sowie »wahrscheinlich« von Belang, bei denen man unterstellt, sie hätten nur eine richtige Bedeutung, nämlich das logische UND (das wir beispielsweise in Suchmaschinen verwenden) und die mathematische Wahrscheinlichkeit

17 Lit. Tversky und Kahneman (1982, S. 98). Es sei darauf hingewiesen, dass hier und im Folgenden mit dem Begriff Logik die Gesetze der Logik erster Ordnung bezeichnet werden.

18 Lit. Gould (1994, S. 544). Zu eingehenderen Informationen über die angeblichen Konsequenzen siehe Johnson *et al.* (1993); Kanwisher (1989); Stich (1985).

(Vergleich der Zahl positiver Ergebnisse mit der Zahl möglicher Ergebnisse). Ich nenne solche Normen inhaltsblind, weil sie den Inhalt und die Denkziele außer Acht lassen. Starre logische Normen berücksichtigen nicht, dass Intelligenz in einer ungewissen Welt – und nicht in der künstlichen Gewissheit eines logischen Systems – operiert und daher über die verfügbare Information hinausgehen muss. Eine entscheidende Ursache für die Ungewissheit des Linda-Problems ist die Bedeutung der Wörter »wahrscheinlich« sowie »und«. Beide Wörter haben mehrere Bedeutungen, wie jedes gute Wörterbuch beweist. Einige wenige Definitionen von »wahrscheinlich« beziehen sich tatsächlich auf eine relative Häufigkeit und entsprechen damit der mathematischen Wahrscheinlichkeit, die meisten aber nicht. So gibt das Duden-Synonymwörterbuch (3. Auflage, Mannheim 2004) unter anderem die Bedeutungen »nach menschlicher Voraussicht«, »sicher«, »wohl« und »mutmaßlich«. Unser Gehirn löst dieses Mehrdeutigkeitsproblem durch die Verwendung intelligenter Faustregeln, und genauso verfahren nach meiner Überzeugung das Denken und das Sprachverständnis. Eine dieser unbewussten Regeln, die wir verwenden, um die Bedeutung von Sprache zu verstehen, ist das Relevanzprinzip:¹⁹

Nimm an, der Sprecher folgt dem Prinzip »Sei relevant«.

Der unbewusste Schluss besagt: Wenn der Versuchsleiter mir Lindas Beschreibung vorliest, ist diese sehr wahrscheinlich relevant für das, was er von mir erwartet. Doch die Beschreibung wäre völlig irrelevant, wenn man den Begriff »wahrscheinlich« als mathematische Wahrscheinlichkeit verstünde. Daher legt die Relevanzregel nahe, dass »wahrscheinlich« eine Bedeutung haben muss, welche die Beschreibung relevant macht, etwa im Sinn von plausibel. Achte auf die Beschreibung – Goulds Homunkulus hat diesen Punkt verstanden.

Beruht die übliche Antwort auf das Linda-Problem auf einem Fehlschluss oder einer intelligenten Intuition? Um zu sehen, welche Ursache zutrifft, baten Ralph Hertwig und ich Personen, das Linda-Problem für jemanden zu umschreiben, der kein Muttersprachler ist und die Bedeutung von »wahrscheinlich« nicht kennt. Die meisten Befragten verwendeten nichtmathematische Bedeutungen – das heißt, sie gaben an, ob es möglich, denkbar, plausibel, vernünftig oder typisch sei. Nur wenige benutzten »häufig« oder andere mathematische Bedeutungen.

19 Der Linguist Paul Grice (1989) untersuchte diese Faustregel des Gesprächs.

gen. Daraus ist zu schließen, dass es hier eher um intelligente Intuition geht als um einen logischen Fehler, insbesondere um die Fähigkeit, den Sinn mehrdeutiger Äußerungen mithilfe von Gesprächsregeln zu erschließen. Zur genaueren Überprüfung dieser Hypothese veränderten wir den mehrdeutigen Ausdruck »wahrscheinlich« in die eindeutige Wendung »wie viele«:

Es gibt hundert Personen, auf die die obige Beschreibung (von Linda) zutrifft. Wie viele von ihnen sind

- Bankangestellte?
- Bankangestellte und in der Frauenbewegung aktiv?

Wenn Befragte tatsächlich nicht verstehen, dass eine Menge nicht kleiner als eine Teilmenge sein kann, und diesen logischen Fehler ständig begehen, sollte die neue Version die gleichen Ergebnisse hervorbringen wie die alte. Wenn dagegen kein Fehler vorliegt und die Befragten intelligent und unbewusst auf jene Bedeutungen von »wahrscheinlich« schließen, die der Beschreibung von Linda Relevanz verleihen, müssten diese Bedeutungen jetzt ausgeschlossen werden und der vermeintliche Fehlschluss weitgehend verschwinden. Und genau das geschah (Abb. 4).²⁰ Das Ergebnis entspricht früheren Untersuchungen der Schweizer Psychologen Bärbel Inhelder und Jean Piaget, die ähnliche Experimente an Kindern durchführten (»Gibt es mehr Blumen oder mehr Primeln?«) und berichteten, dass im Alter von acht Jahren eine Mehrheit Antworten gab, welche berücksichtigten, dass eine Menge nicht kleiner als eine Teilmenge sein kann. Halten wir fest, dass die Kinder gefragt wurden, »wie viele« und nicht »wie wahrscheinlich«. Die Logik ist keine geeignete Norm, um beim Linda-Problem die Frage »Welche Alternative ist wahrscheinlicher« zu verstehen. Die menschliche Intuition ist weit vielfältiger und kann auch unter Unsicherheit plausible Vermutungen anstellen.

²⁰ Hertwig und Gigerenzer (1999); siehe auch Fiedler (1988); Mellers, Hertwig und Kahneman (2001). Tversky und Kahneman (1983) fanden bei einer anderen Aufgabe einen ähnlichen Effekt, hielten aber an ihrer logischen Norm fest (Gigerenzer 2000). Ein anderer Grund für diesen sog. Fehlschluss könnte darin liegen, dass man aus dem Satz »Linda ist eine Bankangestellte« herausliest: »Linda ist eine Bankangestellte und nicht in der Frauenbewegung aktiv.« Das mag gelegentlich passieren, kann aber nicht erklären, dass der Fehlschluss weitgehend verschwindet, wenn »wahrscheinlich« durch »wie viele« ersetzt wird.

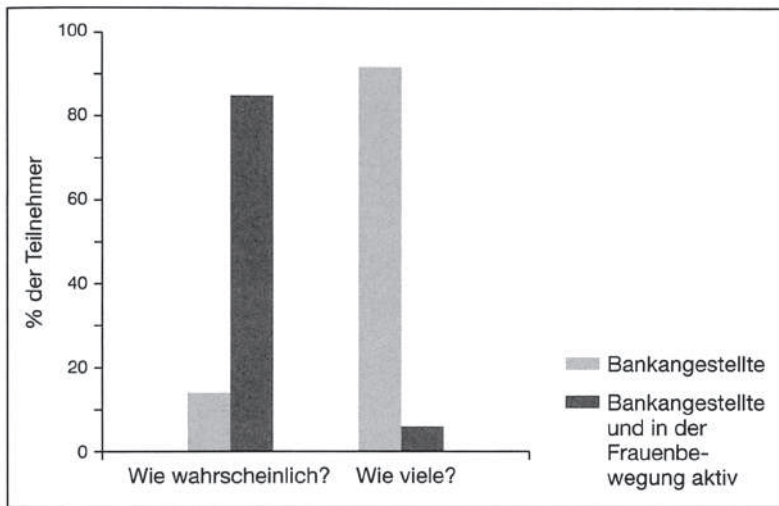


Abbildung 4: Ist Linda eine Bankangestellte?

Das Linda-Problem – und Hunderte von Studien, die in seinem Kielwasser durchgeführt wurden, um herauszufinden, wann Menschen mehr oder weniger logisch denken – macht deutlich, wie Forscher sich von der Logik dazu verleiten lassen, die falschen Fragen zu stellen und die interessanten, psychologischen zu vernachlässigen. Es geht nicht darum, ob unsere Intuitionen den Gesetzen der Logik folgen und sie danach zu bewerten, sondern welche unbewussten Faustregeln den Intuitionen zugrunde liegen. Schauen wir uns das natürliche Sprachverständnis etwas näher an.

In der Logik erster Ordnung ist der Operator UND kommutativ, das heißt $a \text{ UND } b$ ist gleich $b \text{ UND } a$. Doch das entspricht nicht unserem natürlichen Sprachverständnis. Betrachten Sie beispielsweise die beiden folgenden Sätze:

Petra und Paul heirateten, und Petra wurde schwanger.

Petra wurde schwanger, und Petra und Paul heirateten.

Intuitiv wissen wir, dass die beiden Sätze unterschiedliche Botschaften vermitteln. Der erste lässt erkennen, dass die Schwangerschaft auf die Ehe folgte, während sich aus dem zweiten ergibt, dass die Schwangerschaft zuerst eintrat und ein möglicher Grund für die Eheschließung

war. Würde unsere Intuition logisch arbeiten und das Wort »und« als Operator UND verstehen, würden wir den Unterschied nicht wahrnehmen. »Und« kann eine zeitliche oder ursächliche Beziehung bezeichnen, von denen keine kommutativ ist. Hier zwei weitere Paare:

Markus wurde zornig, und Maria ging.

Maria ging, und Markus wurde zornig.

Verona liegt in Italien, und Valencia liegt in Spanien.

Valencia liegt in Spanien, und Verona liegt in Italien.

Augenblicklich verstehen wir, dass das erste Satzpaar gegensätzliche Botschaften vermittelt, während das zweite Paar identische Bedeutungen hat. Nur im letzten Paar wird das »und« in der Bedeutung des logischen Operators UND verwendet. Noch überraschender ist der Umstand, dass wir auch ohne nachzudenken wissen, wann wir »und« als das logische ODER interpretieren müssen, etwa in dem Satz:

Wir luden Freunde und Kollegen ein.

Der Satz bezeichnet die Vereinigungsmenge von Freunden und Kollegen, nicht ihre Schnittmenge. Nicht jeder ist sowohl Freund als auch Kollege; viele sind entweder das eine oder das andere. Abermals verletzt das intuitive Verständnis die Konjunktionsregel, doch das ist kein Urteilsfehler, sondern ein Indiz dafür, dass die natürliche Sprache vielschichtiger ist als die Logik.

Woher wissen wir auf einen Blick, was »und« im jeweiligen Kontext bedeutet? Diese Schlüsse weisen die drei Kennzeichen der Intuition auf: Ich weiß die Bedeutung sofort, ich handle danach, aber ich weiß nicht, woher ich das weiß. Da ein einziger Satz als Kontext genügt, müssen die Hinweise vom Inhalt des Satzes geliefert werden. Bis heute ist es Sprachwissenschaftlern immer noch nicht gelungen, die Faustregeln herauszufinden, die dieser bemerkenswert intelligenten Intuition zugrunde liegen. Kein Computerprogramm kann die Bedeutung eines »und« so gut entschlüsseln wie wir. Das sind die interessantesten unbewussten Prozesse, die wir nur zum Teil verstehen, die unsere Intuition aber innerhalb eines Augenblicks meistert.

Die Rekognitionsheuristik

Die Rekognitionsheuristik ist ein einfaches Werkzeug aus dem adaptiven Werkzeugkasten, das als Richtschnur für intuitive Urteile dient – für Schlussfolgerungen ebenso wie für persönliche Entscheidungen. Ein Urteil bezeichnet man als Schlussfolgerung, wenn es ein einzelnes, eindeutiges Kriterium dafür gibt, etwa ob der DAX in dieser Woche steigen wird oder ob ein bestimmter Spieler das Tennisturnier in Wimbledon gewinnen wird oder nicht. Schlussfolgerungen können richtig oder falsch sein, und sie können uns ein Vermögen einbringen oder kosten. Wenn es kein einzelnes, leicht zu bestätigendes Kriterium gibt, spricht man von einer persönlichen Entscheidung – zum Beispiel wenn es um die Wahl eines Kleides, eines Lebensstils oder eines Partners geht. Persönliche Entscheidungen sind eher eine Frage des Geschmacks als eine objektiver Richtigkeit, obwohl die Grenze zwischen beidem manchmal verschwimmt.

Schauen wir uns zunächst die persönlichen Entscheidungen an. Ein Wirtschaftsprofessor erzählte mir, dass er sich auf die Markenwiedererkennung verlässt, wenn er eine Stereoanlage kauft. Er verschwendet keine Zeit damit, Fachzeitschriften zurate zu ziehen, um sich über die Fülle an Stereogeräten zu informieren, die den Markt überschwemmen. Stattdessen berücksichtigt er nur Markennamen, von denen er gehört hat, wie zum Beispiel Sony. Seine Faustregel lautet:

Wenn du eine Stereoanlage kaufst, wähle eine Marke, die du wiedererkenntst, und das zweitbilligste Gerät.

Markenwiedererkennung schränkt die Wahl ein, und das Prinzip des zweitniedrigsten Preises wird hinzugefügt, um die endgültige Entscheidung zu treffen. Dem liegt die Überlegung zugrunde, dass bekannte Unternehmen wahrscheinlich gute Produkte herstellen. Seinen zweiten Schritt rechtfertigt der Professor damit, dass die Qualität der Stereotechnik ein Niveau erreicht hat, auf dem er keine Unterschiede mehr hört. Das Preisprinzip soll das billigste und möglicherweise unzuverlässigste Modell ausschließen, welches das Unternehmen für den Niedrigpreismarkt produziert. Diese Regel erspart ihm Zeit und bewahrt ihn vermutlich vor einem Reinfall.

Betrachten wir jetzt die Schlussfolgerungen. Die Rekognitionsheuristik kann genaue Schlüsse ziehen, wenn es eine nennenswerte Korrelation gibt zwischen Wiedererkennung und dem, was Sie wissen

wollen. Aus Gründen der Einfachheit nehme ich an, dass die Korrelation positiv ist und es nur zwei Alternativen gibt:

Wenn du ein Objekt wiederer kennst, aber das andere nicht, ziehe den Schluss, dass das wiedererkannte Objekt einen höheren Wert hat.

Ob die Korrelation positiv oder negativ ist, kann die Erfahrung lehren. Nennenswerte Korrelationen zwischen Namenswiedererkennung und Qualität liegen in Wettbewerbssituationen vor, etwa wenn es um den Wert von Unternehmen oder Sportmannschaften geht. Gibt es eine solche Korrelation, ist Unwissenheit informativ, das heißt, der Umstand, dass Sie noch nicht von einer Firma oder einem Team gehört haben, teilt Ihnen etwas über die zur Wahl stehenden Objekte mit. Eine einfache Methode, um zu messen, in welchem Maße Ihre Unwissenheit informativ ist, stellt Ihre Rekognitionsvalidität dar. Nehmen wir die sechzehn Begegnungen im Einzelwettbewerb der Herren der dritten Runde des Wimbledon-Turniers 2003:

Andy Roddick – Tommy Robredo	Younes el Aynaoui – Andre Agassi
Roger Federer – Mardy Fish	Robin Soderling – Tim Henman
Paradorn Srichaphan – Rafael Nadal	Karol Kučera – David Nalbandian
Rainer Schüttler – Todd Martin	Radek Štěpánek – Mark Philippoussis
Jonas Björkman – Justin Gimelstob	Sargis Sargsian – Juan Carlos Ferrero
Max Mirnyi – Ivo Karlović	Jarkko Nieminen – Olivier Rochus
Feliciano López – Flavio Saretta	Jiří Novák – Alexander Popp
Sjeng Schalken – Victor Hanescu	Wesley Moodie – Sebastien Grosjean

Weder kann ein Experte, der alle Namen in dem Teilnehmerfeld wiedererkennt, noch jemand, der nie von einem dieser Spieler gehört hat, mithilfe der Rekognitionsheuristik auf den Gewinner schließen. Nur wenn Sie partiell unwissend sind, das heißt, wenn Sie von einigen, aber nicht allen Spielern schon einmal gehört haben, kann sie Ihren Intuitionen als Leitschnur dienen. Wenn Sie Ihre persönliche Rekognitionsvalidität bestimmen wollen, markieren Sie die Namen all der Tennisspieler, von denen Sie schon einmal gehört haben. Nehmen Sie dann die Paarungen, bei denen Sie schon vom einen, aber nicht vom anderen Spieler gehört haben. Zählen Sie die Fälle, in denen der Spieler, dessen Namen Sie wiedererkannt haben, das Match gewonnen hat (der Sieger ist in der linken Spalte immer als Erster und in der rechten Spalte immer als Zweiter aufgeführt). Teilen Sie diese Zahl durch die Zahl aller Paarungen, bei denen Sie einen, aber nicht beide Spieler wiedererkennen, und

Sie erhalten Ihre Rekognitionsvalidität für dieses Spielerfeld. Wenn Sie beispielsweise nur Roddick, Federer, Schüttler, Agassi und Novák wiedererkennen, sagt die Rekognitionsheuristik die Ergebnisse in vier von fünf Fällen richtig voraus, das heißt, Ihre Rekognitionsvalidität beträgt 80 Prozent. Auf diese Faustregel gestützt, lägen Sie nur beim Spiel zwischen Novák und Popp falsch, obwohl Sie fast gar nichts wüssten. Am effektivsten können Sie die Rekognitionsheuristik anwenden, wenn Sie von der Hälfte der Spieler gehört haben, nicht mehr und nicht weniger. Liegt Ihre Rekognitionsvalidität über 50 % wohnt Ihrem Unwissen ein eigenes Wissen inne; Sie schneiden besser ab als der Zufall. Wenn Sie dies auch in anderen Fällen testen wollen – hier die Formel:

Rekognitionsvalidität = Zahl der richtigen Schlüsse geteilt durch die Zahl der richtigen plus der falschen Schlüsse.

Die Rekognitionsheuristik führt wie jede Faustregel nicht immer zur richtigen Antwort. Infolgedessen ist die Rekognitionsvalidität in der Regel kleiner als 100 Prozent. Ihre Wiedererkennung hat nicht bei allen Problemen die gleiche Validität, sondern hängt von der Kategorie der Objekte ab (etwa den Teilnehmern des diesjährigen Herreneinzelwettbewerbs in Wimbledon) und der Art von Schlüssen, die zu ziehen sind (etwa wer gewinnen wird). Nehmen wir beispielsweise lebensbedrohliche Krankheiten und Infektionen. Als man die Teilnehmer einer Studie schlussfolgern ließ, welche von zwei Krankheiten, etwa Asthma oder Tularämie, häufiger sei, ermittelte man eine Rekognitionsvalidität von rund 60 Prozent.²¹ Das heißt, die wiedererkannten Krankheiten waren in 60 Prozent der Fälle auch die verbreiteteren. Das ist besser als der Zufall, aber nicht so gut wie die Vorhersage der Sieger in Wimbledon, wo der Wert bei rund 70 Prozent liegt. Wenn wir erschließen wollen, welche von zwei ausländischen Städten mehr Einwohner hat, ist die Validität sogar noch höher, ungefähr bei 80 Prozent. In jedem Fall gibt es einen Mediator, welcher der breiten Öffentlichkeit die Na-

21 Lit. Pachur und Hertwig (2006). Die Rekognitionsvaliditäten für die Herreneinzelpaarungen in Wimbledon 2003 finden sich bei Serwe und Frings (2006) und für die Einwohnerzahlen von Städten bei Goldstein und Gigerenzer (2002) sowie bei Pohl (2006). Wichtig ist, dass es bei der Rekognitionsheuristik um Schlussfolgerungen aus dem Gedächtnis geht, nicht um Schlussfolgerungen aus schriftlich vorliegenden Fakten, die Informationen über die nicht wiedererkannte Alternative enthalten können.

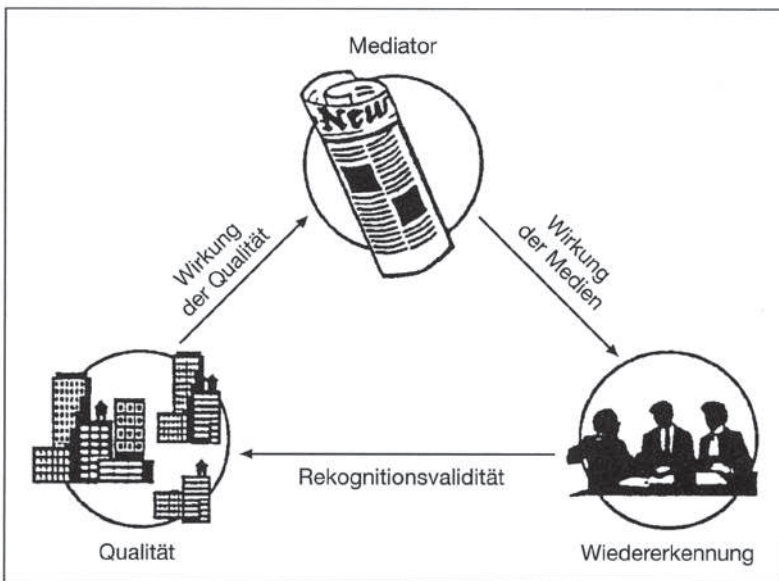


Abbildung 5: Wie funktioniert die Rekognitionsheuristik? Wirkung der Qualität: Hochwertige Objekte werden in den Medien häufiger erwähnt als minderwertige Objekte. Wirkung der Medien: Die Objekte, die häufiger genannt werden, werden auch häufiger wiedererkannt. Rekognitionsvalidität: Objekte, die häufiger wiedererkannt werden, sind daher auch häufiger von besserer Qualität (nach Goldstein und Gigerenzer 2002).

men von Krankheiten, Tennisspielern oder Städten zur Kenntnis bringt. Zu diesen Mechanismen gehören Zeitungen, Radio, Fernsehen und Mund-zu-Mund-Propaganda.

Abbildung 5 verdeutlicht, wie die Rekognitionsheuristik wirkt. Auf der rechten Seite sehen wir Personen mit eingeschränkter Namenswiedererkennung. Auf der linken Seite steht das, was sie zu schlussfolgern versuchen (Qualität), also zum Beispiel, wer einen sportlichen Wettkampf gewinnen wird, welche Stadt größer oder welches Produkt besser ist. Oben befindet sich ein Mediator der jeweiligen Umwelt, etwa Zeitungen. Die Qualität eines Spielers oder eines Produkts kann darin zum Ausdruck kommen, wie oft ihre Namen in der Presse erwähnt werden. In diesem Fall ist die Wirkung der Qualität hoch. So könnte ein Hersteller von Laufschuhen beschließen, hochwertige Schuhe zu fertigen, und darauf vertrauen, dass die Produktqualität zu einem aus-

geprägten Profil in den Medien führt. Je häufiger wiederum ein Name in Medienberichten auftaucht, desto wahrscheinlicher ist es, dass jemand den Namen schon einmal gehört hat, unabhängig von seiner tatsächlichen Qualität. Der Hersteller könnte sich aber auch mit einem mittelmäßigen Produkt zufriedengeben, direkt in Werbung investieren und sich darauf verlassen, dass die Leute das Produkt kaufen werden, weil sie davon gehört haben. Hier ist die Wirkung der Medien von Bedeutung. Dadurch wird das Dreieck kurzgeschlossen, was in der Tat viele Werbetreibende tun. Indem wir die Wirkung von Qualität und Medien messen, können wir vorhersagen, in welchen Situationen es informativ oder irreführend ist, sich auf die Namenswiedererkennung zu verlassen.

Wann soll man dem Unwissendsten folgen?

Wenden wir uns noch einmal der Gameshow vom Anfang zu. Dieses Mal stellt der Moderator einer Dreiergruppe die Eine-Million-Euro-Frage: »Welche Stadt hat mehr Einwohner, Detroit oder Milwaukee?« Abermals ist sich niemand der Antwort gewiss. Wenn sich die Kandidaten untereinander uneins sind, sollte man meinen, dass die Mehrheit die Gruppenentscheidung bestimmt. Das bezeichnet man als Mehrheitsregel.²² In einem Experiment entstand nun der folgende Konflikt: Zwei Gruppenmitglieder hatten von beiden Städten gehört und entschieden unabhängig voneinander, dass Milwaukee größer sei. Doch das dritte Gruppenmitglied kannte Milwaukee überhaupt nicht, nur Detroit, und gelangte daher zu dem Schluss Detroit müsse größer sein. Auf was einigten sich die drei? Angesichts der Tatsache, dass zwei Mitglieder zumindest ein bisschen etwas über beide Städte wussten, könnte man annehmen, dass die Mehrheit ihren Willen durchsetzte. Überraschenderweise stimmte die Gruppe in mehr als der Hälfte aller Fälle (59 Prozent) für die Wahl des unwissendsten Mitglieds. Diese Zahl stieg auf 76 Prozent, wenn zwei Mitglieder sich nur auf Wiedererkennung verließen.²³

22 Lit. Gigone und Hastie (1997). Die Mehrheitsregel ist für Situationen beschrieben worden, in denen die richtige Antwort von keinem Gruppenmitglied bewiesen werden kann (wie es bei einer mathematischen Aufgabe der Fall wäre).

23 Lit. Reimer und Katsikopoulos (2004).

Es mag seltsam erscheinen, dass Menschen ihre Antwort von der Person in ihrer Mitte bestimmen ließen, die am wenigsten wusste. Man kann aber beweisen, dass es sich um eine erfolgreiche Intuition handelt, wenn die Rekognitionsvalidität größer als die Wissensvalidität ist, was für die Teilnehmer an diesem Experiment galt. Folglich erhöht die scheinbar irrationale Entscheidung, dem unwissendsten Gruppenmitglied zu folgen, den Erfolg der Gruppe. Die Untersuchung zeigte auch einen Weniger-ist-mehr-Effekt in Gruppen. Wenn zwei Gruppen im Durchschnitt das gleiche Maß an Wiedererkennung und Wissen haben, gab die Gruppe, die weniger Städte erkannte, in der Regel mehr richtige Antworten. So erkannten die Mitglieder der einen Gruppe im Durchschnitt nur 60 Prozent der Städte, die in einer zweiten Gruppe 80 Prozent; doch die erste Gruppe hatte von 100 Fragen 83 richtig beantwortet, während die zweite es nur auf 75 richtige Antworten brachte. Intuitiv schienen die Gruppenmitglieder dem Wert der Wiedererkennung zu vertrauen, was die Zahl der richtigen Antworten erhöhen und zum erwartungswidrigen Weniger-ist-mehr-Effekt führen kann.

Wie bewusst war die Gruppenentscheidung, der Weisheit der Unwissenheit zu vertrauen? Die Gruppendiskussionen, die auf Videoband aufgezeichnet wurden, zeigen, dass in einigen wenigen Fällen die am schlechtesten unterrichteten Gruppenmitglieder die Auffassung vorbrachten, eine bestimmte Stadt müsse kleiner sein, weil sie noch nicht von ihr gehört hätten, und die anderen sich konkret dazu äußerten. Doch in den meisten Fällen wurde es in den Diskussionen nicht zur Sprache gebracht. Interessant ist jedoch, dass Teilnehmer, die sich auf die Rekognitionsheuristik stützten, Blitzentscheidungen trafen und damit Gruppenmitglieder beeindruckten, die mehr wussten und Zeit brauchten, um zu überlegen.

Nach Markennamen einkaufen

Beim Lesen von Zeitschriften oder beim Fernsehen wird Ihnen aufgefallen sein, dass ein Großteil der Werbung nicht informativ ist. Die berühmte Benetton-Werbung beispielsweise präsentierte lediglich den Markennamen zusammen mit schockierenden Bildern, unter anderem Leichen in einer riesigen Blutlache und sterbende Aids-Patienten. Warum investieren Firmen in Werbung solcher Art? Die Antwort lautet: um den Wiedererkennungswert des Markennamens zu verbessern –

was wichtig ist, weil sich Verbraucher auf die Rekognitionsheuristik verlassen. Oliviero Toscani, Designer und Verantwortlicher der Benetton-Kampagne, wies darauf hin, dass die Anzeigen Benetton an Chanel vorbei unter die fünf bekanntesten Markennamen der Welt katapultiert und sich Benettos Absatz verzehnfacht habe.²⁴ Würden sich die Menschen bei Konsumententscheidungen nicht an Markennamen orientieren, bliebe die nichtinformierende Werbung wirkungslos und wäre überflüssig.

Die Wirkung von Markennamen betrifft auch Lebensmittel. In einem Experiment hatten die Teilnehmer die Wahl zwischen drei Gläsern Erdnussbutter.²⁵ In einem Vortest wurde eine Marke in der Qualität höher eingestuft, die Teilnehmer konnten das hochwertigere Produkt bei einem Blindversuch in 59 Prozent der Fälle bestimmen (also deutlich über dem Zufallsniveau, das bei 33 Prozent lag). Bei einer anderen Versuchsgruppe klebten die Versuchsleiter Etiketten auf die Gläser. Eines war eine landesweit bekannte Marke, die stark beworben und von allen Teilnehmern erkannt wurde. Von den anderen beiden Marken hatten sie noch nie gehört. Dann füllten die Versuchsleiter die höherwertige Erdnussbutter in eines der mit den unbekannten Namen etikettierten Gläser. Wählten die Teilnehmer auch jetzt noch die besser schmeckende Erdnussbutter? Nein. Dieses Mal entschieden sich 73 Prozent für das minderwertigere Produkt mit dem Etikett der wiedererkannten Marke, und nur 20 Prozent wählten das höherwertige Produkt (Abb. 6). Die Namenswiedererkennung war einflussreicher als die Geschmackswahrnehmung. In einem zweiten Geschmackstest füllten die Versuchsleiter exakt die gleiche Erdnussbutter in alle drei Gläser, klebten auf zwei Gläser Etiketten unbekannter Marken und auf eines das Etikett einer bekannten Marke. In diesem Fall wählten 75 Prozent der Teilnehmer das Glas mit der erkannten Marke, obwohl es den gleichen Inhalt hatte wie die beiden anderen Gläser (Abb. 7). Auch die Auszeichnung einer Marke mit einem höheren Preis wirkte sich nicht sonderlich aus. Geschmack und Preis waren im Vergleich zum Einfluss der Rekognitionsheuristik nur von geringer Bedeutung.

Sich auf die Wiedererkennung von Markennamen zu verlassen, ist dann sinnvoll, wenn eine Firma zunächst die Produktqualität erhöht und wenn die verbesserte Qualität dann die Namenswiedererkennung

²⁴ Lit. Toscani (1997).

²⁵ Lit. Hoyer und Brown (1990).

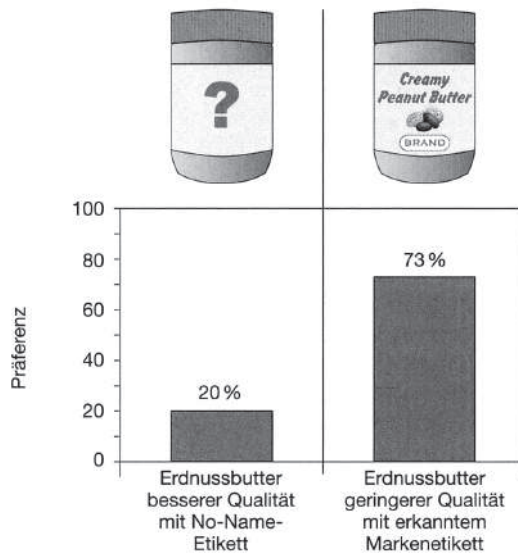


Abbildung 6: Markennamen schmecken besser. In einem Geschmackstest wurden Menschen aufgefordert, hochwertige Erdnussbutter, die man in ein Glas mit einem *No-Name*-Etikett gefüllt hatte, mit einer minderwertigen Erdnussbutter im Glas einer landesweit bekannten Marke zu vergleichen (Hoyer und Brown 1990).

durch Mund-zu-Mund-Propaganda oder die Medien verstärkt. Diese Konstellation ist in Abbildung 5 wiedergegeben, wo die Konsumenten rechts, die Produktqualität links, die Medien oben angeordnet sind und eine starke Korrelation zwischen Produktqualität und Medienpräsenz zu erkennen ist. Nicht informierende Werbung schließt diesen Prozess jedoch kurz. Unternehmen geben gewaltige Summen aus, um den Bekanntheitsgrad ihres Markennamens in den Medien direkt zu erhöhen. Der Wettbewerb um den Raum im Wiedererkennungsgedächtnis der Verbraucher kann das Interesse an der Verbesserung des Produkts selbst behindern oder mit ihm in Widerstreit treten. In diesem Fall kann die Korrelation zwischen Qualität und Medienpräsenz bei null liegen.

Wenn Verbraucher den Unterschied zwischen Konkurrenzprodukten nur noch bestimmen können, indem sie aufs Etikett schauen, werden Wiedererkennung von Markennamen und Image zum Ersatz für echte Produktpräferenzen. Viele Biertrinker haben eine Lieblingsmarke

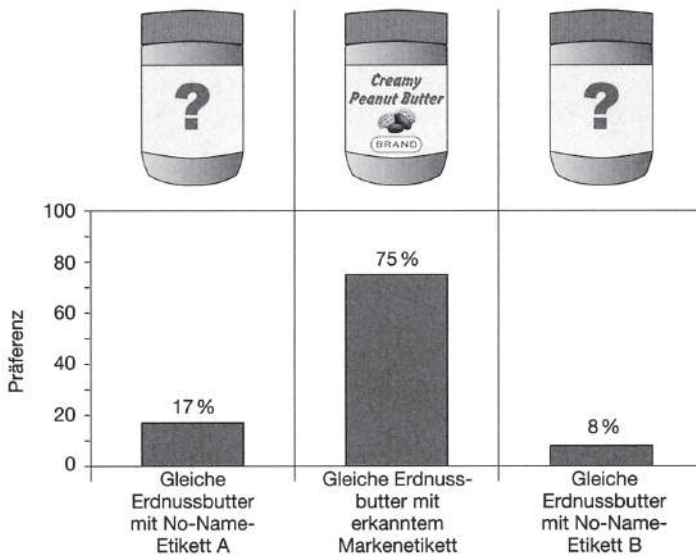


Abbildung 7: Wiedererkennung von Markennamen motiviert Konsumententscheidungen. In einem anderen Geschmackstest befand sich die gleiche Erdnussbutter in drei verschiedenen Gläsern, eines davon mit dem Etikett einer landesweit bekannten Marke versehen (Hoyer und Brown 1990).

und behaupten, sie schmecke besser als andere. Sie beschwören, dass sie mehr Aroma, mehr Körper, weniger Bitterstoffe und genau den richtigen Kohlensäuregehalt habe. Einige Konsumtheorien nehmen solche geäußerten Vorlieben für bare Münze und ziehen daraus den Schluss, dass mehr Optionen wünschenswert seien, damit jeder Konsument das Produkt seiner Wahl finden könne. Doch blinde Geschmackstests haben wiederholt gezeigt, dass Konsumenten nicht in der Lage waren, ihre Lieblingsmarke zu identifizieren. Rund 300 zufällig ausgewählten amerikanischen Biertrinkern (die Bier mindestens dreimal die Woche tranken) gab man fünf landesweit und regional vertriebene Biermarken zum Probieren.²⁶ Die Biertrinker schrieben »ihren« Marken bessere Eigenschaften als anderen Marken zu, solange das Etikett auf der Flasche klebte. Wurde es jedoch abgenommen, und der Test war blind,

²⁶ Lit. Allison und Uhl (1964).

stufte keine der Gruppen, die eine bestimmte Marke bevorzugte, ihr Bier noch als überlegen ein.

Wenn Verbraucher Konkurrenzmarken nur dem Namen nach unterscheiden können, lässt sich die Theorie, dass mehr Wahlmöglichkeiten immer besser seien, kaum rechtfertigen. Firmen, die ihr Geld dafür ausgeben, Raum in Ihrem Wiedererkennungsgedächtnis zu kaufen, wissen das längst. Ganz ähnlich verfahren Politiker, die für ihren Namen und ihr Gesicht werben und nicht für ihr Programm, sowie Möchtegern-Promis und sogar kleine Nationen ganz nach dem Prinzip: Wer unseren Namen nicht erkennt, wird uns auch nicht bevorzugen. Im Extremfall wird der Name sogar zum Ziel an sich.

Wissen wir, wann wir dem Bekannten vertrauen können?

Die effektive Anwendung der Rekognitionsheuristik hängt von zwei Prozessen ab, Wiedererkennung und Evaluation. Der erste fragt: »Erkenne ich diese Alternative wieder?«, und bestimmt, ob diese Heuristik angewendet werden kann. Der zweite fragt: »Soll ich mich auf die Wiedererkennung verlassen?«, und bewertet (evaluiert), ob sie für die vorliegende Situation eingesetzt werden sollte. Beispielsweise widerstrebt es den meisten Menschen, unbekannte Pilze, auf die wir beim Waldspaziergang stoßen, zu sammeln und zu essen. Doch wenn wir die gleichen Pilze in einem guten Restaurant auf dem Teller finden, werden wir sie wahrscheinlich ohne zögern verspeisen. Im Wald halten wir uns an die Rekognitionsheuristik:

Wenn wir den Pilz nicht kennen, könnte er giftig sein.

Im Restaurant wenden wir sie nicht an, weil das Unbekannte in dieser Umwelt gewöhnlich gefahrlos ist. Dieser Evaluationsprozess ist nicht immer bewusst. Menschen wissen intuitiv, wann ein Mangel an Wiedererkennung einen Mangel an Sicherheit bedeutet.

In automatischen (reflexartigen) Faustregeln ist der Evaluationsprozess nicht enthalten. Dagegen ist die Rekognitionsheuristik flexibel und kann bewusst unterdrückt werden. Wie der Evaluationsprozess arbeitet, wissen wir noch nicht, doch wir haben einige Hinweise. Ein Aspekt dieses Prozesses scheint die Frage zu sein, ob wir verlässliches Wissen über das, was wir wissen möchten, abrufen können. Als man etwa Mitglieder der *Stanford University* fragte, ob Sausalito (eine Kleinstadt

unmittelbar nördlich der *Golden-Gate*-Brücke mit lediglich siebentausendfünfhundert Einwohnern) oder Heingjing (ein erfundener Name, der sich nach einer chinesischen Stadt anhört) mehr Einwohner habe, verließen sich die meisten nicht mehr auf die Namenswiedererkennung. Da sie mit Sicherheit wussten, dass die Ortschaft nebenan klein ist, nahmen sie an, es müsse Heingjing sein.²⁷ Der Ursprung der Wiedererkennung scheint ein weiterer Aspekt zu sein, der dem Evaluationsprozess unterzogen wird. In derselben Studie wurden die Teilnehmer gefragt, ob Tschernobyl oder Heingjing größer sei, und nur wenige entschieden sich für Tschernobyl, das vor allem durch den Kernkraftunfall bekannt war, was nichts mit seiner Größe zu tun hat. Sich in solchen Fällen nicht auf die Namenswiedererkennung zu verlassen, ist eine adaptive und intelligente Reaktion, außer in dieser Untersuchung, bei der der Versuchsleiter die Teilnehmer täuschte, indem er eine Stadt heranzog, die es gar nicht gibt.

Gibt es ein neuronales Korrelat des Evaluationsprozesses?

Ich habe die Ansicht vertreten, dass die Rekognitionsheuristik flexibel angewendet wird. Das heißt, das Gehirn evaluiert, ob sie in einer gegebenen Situation zum Einsatz kommen soll. Diese Art der Evaluation bezeichne ich als Intelligenz des Unbewussten. Wenn ein solcher Evaluationsprozess existiert, müsste er von den Wiedererkennungsprozessen getrennt sein. Daher sollten sich deutlich lokalisierte neuronale Aktivitäten im Gehirn nachweisen lassen, wenn Menschen sich für oder wider eine Heuristik entscheiden. In einer Studie mit bildgebenden Verfahren (funktionelle Kernspintomografie oder fMRI) präsentierten wir Teilnehmern Städtepaare aus Kanada, England, Frankreich, Holland, Italien, Spanien und den USA, während sie dem Hirnscan unterzogen wurden.²⁸ Die Aufgabe einer Gruppe bestand darin, bei jedem Paar die Stadt mit der größeren Einwohnerzahl anzugeben; die andere

27 Lit. Oppenheimer (2003). Siehe auch Pohl (2006).

28 Lit. Volz *et al.* (2006). In dieser Untersuchung folgten die Urteile der Rekognitionsheuristik in 84 Prozent der Fälle, ähnlich wie in früheren Experimenten. Wenn außerdem Teilnehmer partiell unwissend waren, wenn sie also nur von einer der beiden Städte gehört hatten, gaben sie mehr richtige Antworten, als wenn sie beide Städte dem Namen nach kannten.

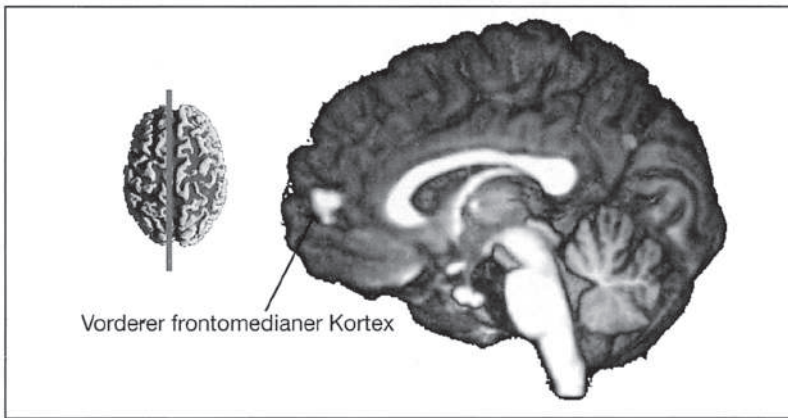


Abbildung 8: Neuronales Korrelat des Evaluationsprozesses. Wenn Testpersonen entscheiden, ob sie sich auf die Rekognitionsheuristik verlassen sollen, lässt sich im vorderen frontomedianen Kortex eine spezifische neuronale Aktivität beobachten.

Gruppe sollte einfach nur sagen, von welchen Städten sie schon einmal gehört hatte. Dabei umfasste die erste Aufgabe einen Evaluationsprozess, während die zweite nur das Wiedererkennungsgedächtnis ansprach.

Haben die Hirnscans ein neuronales Korrelat dieses Evaluationsprozesses nahegelegt? Eine solche Aktivität muss sehr spezifisch sein. Das heißt, die besondere Gehirnaktivität müsste zu beobachten sein, falls die Teilnehmer in der ersten Gruppe die Rekognitionsheuristik anwendeten, und fehlen, wenn die Teilnehmer der zweiten Gruppe einfach nur angaben, ob sie eine Stadt erkannten oder nicht. Unsere Untersuchung ließ eine spezifische Aktivität im vorderen frontomedianen Kortex der ersten, aber nicht der zweiten Gruppe erkennen (Abb. 8). Die Lokalisierung der Aktivität lässt darauf schließen, dass der Prozess nicht impulsiv ist, sondern auf unbewusster Intelligenz beruht. Strittig ist noch immer, was dieser Teil des Gehirns tatsächlich für uns leistet, obwohl bereits die Ansicht geäußert wurde, er nehme Evaluationsfunktionen wahr, kontrolliere Fehler und schlichte Rekognitionskonflikte. Seine spezifische Aktivität lässt darauf schließen, dass es tatsächlich ein neuronales Korrelat des Evaluationsprozesses gibt, der Intelligenz des Unbewussten.

Literatur

- Allison, R. I. und K. P. Uhl: Influence of beer brand identification on taste perception. In: *Journal of Marketing Research* 1 (1964), S. 36 ff.
- Bargh, J. A.: Conditional automaticity: Varieties of automatic influence in social perception and cognition. In: J. S. Uleman und J. A. Bargh (Hg.): *Unintended thought*. New York 1989, S. 3-51.
- Brighton, H.: Robust inference with simple cognitive models. In: C. Lebiere und B. Wray (Hg.): *Between an rock and a hard place: Cognitive science principles meet AI-hard problems. Papers for the AAAI Spring Symposium [AAAI-Bericht SS-06-03]*. Menlo Park 2006, S. 17-22.
- Bröder, A.: Decision making with the »adaptive toolbox«: Influence of environmental structure, intelligence, and working memory load. *Journal of Experimental Psychology* 29 (2003), S. 611-625.
- Bröder, A. und S. Schiffer: Bayesian strategy assessment in multi-attribute decision making. *Journal of Behavioral Decision Making* 16 (2003), S. 193-213.
- Brunswik, E.: Probability as a determiner of rat behavior. *Journal of Experimental Psychology* 25 (1939), S. 175-197.
- Cosmides, L. und J. Tooby: Cognitive adaptations for social exchange. In: J. H. Barkow, L. Cosmides und J. Tooby (Hgg.): *The adapted mind: Evolutionary psychology and the generation of culture*. New York 1992, S. 163-228.
- Czerlinski, J., G. Gigerenzer und D. G. Goldstein: How good are simple heuristics? In: G. Gigerenzer, P. M. Todd und ABC Research Group, 1999, S. 97-118.
- Darwin, C.: *Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl*. Leipzig 1952 (englische Erstveröffentlichung 1871).
- Darwin, C.: *Die Entstehung der Arten*. Stuttgart 1963 (englische Erstveröffentlichung 1859).
- Fiedler, K.: The dependence of the conjunction fallacy on subtle linguistic factors. *Psychological Research* 50 (1988), S. 123-129.
- Franklin, B.: Letter to Jonathan Williams (Passy, 8. April 1779). In: A. H. Smyth (Hg.): *The writings of Benjamin Franklin*, Bd. VII. New York 1907, S. 281 f.
- Gallistel, C. R.: *The organization of learning*. Cambridge, MA, 1990.
- Gigerenzer, G.: *Adaptive thinking: Rationality in the real world*. New York 2000.
- Gigerenzer, G.: Content-blind norms, no norms, or good norms? A reply to Vranas. *Cognition* 81 (2001), S. 93-103.
- Gigerenzer, G.: *Das Einmaleins der Skepsis*. Berlin 2002.
- Gigerenzer, G.: Striking a blow for sanity in theories of rationality. In: M. Augier und J. G. March (Hgg.): *Models of a man: Essays in honor of Herbert A. Simon*. Cambridge, MA, 2004b, S. 389-409.
- Gigerenzer, G. und D. G. Goldstein: Reasoning the fast and frugal way: Models of bounded rationality. *Psychological Review* 103 (1996), S. 650-669.

- Gigerenzer, G. und D.G. Goldstein: Betting on one good reason: The Take The Best Heuristic. In: G. Gigerenzer, P.M. Todd und ABC Research Group, 1999, S. 75-95.
- Gigerenzer, G., P.M. Todd und ABC Research Group: Simple heuristics that make us smart. New York 1999.
- Gigone, D. und R. Hastie: The impact of information on small group choice. *Journal of Personality and Social Psychology* 72 (1997), S. 132-140.
- Goldstein, D.G. und G. Gigerenzer: Models of ecological rationality, The recognition heuristic. *Psychological Review* 109 (2002), S. 75-90.
- Gould, S.J.: Bravo, Brontosaurus. Die verschlungenen Wege der Naturgeschichte. Hamburg 1994.
- Grice, H.P.: Studies in the way of words. Cambridge, MA, 1989.
- Hoyer, W.D. und S.P. Brown: Effects of brand awareness on choice for a common, repeat-purchase product. *Journal of Consumer Research* 17 (1990), S. 141-148.
- Johnson, E.J., J. Hershey, J. Meszaros und H. Kunreuther: Framing, probability distortions, and insurance decisions. *Journal of Risk and Uncertainty* 7 (1993), S. 35-51.
- Helmholtz, H. von: Abhandlung der physiologischen Optik. Hildesheim 2003 (Erstveröffentlichung 1856-1866).
- Hertwig, R. und G. Gigerenzer: The »conjunction fallacy« revisited: How intelligent inferences look like reasoning errors. *Journal of Behavioral Decision Making* 12 (1999), S. 275-305.
- Hogarth, R.M. und N. Karelaia: Simple models for multi-attribute choice with many alternatives: When it does and does not pay to face tradeoffs with binary attributes. *Management Science* 51 (2005 a), S. 1860-1872.
- Hogarth, R.M. und N. Karelaia: Ignoring information in binary choice with continuous variables: When is less »more«? *Journal of Mathematical Psychology* 49 (2005 b), S. 115-124.
- Kahneman, D., P. Slovic und A. Tversky (Hgg.): Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Cambridge 1982.
- Kanwisher, N.: Cognitive heuristics and American security policy. *Journal of Conflict Resolution* 33 (1989), S. 652-675.
- Katsikopoulos, K. und L. Martignon: Naive heuristics for paired comparisons: Some results on their relative accuracy. *Journal of Mathematical Psychology* 50 (2006), S. 489 ff.
- Kleffner, D.A. und V.S. Ramachandran: On the perception of shape from shading. *Perception und Psychophysics* 52 (1992), S. 18-36.
- Martignon, L. und U. Hoffrage: Why does one-reason decision making work? A case study in ecological rationality. In: G. Gigerenzer, P.M. Todd und ABC Research Group, 1999, S. 119-140.
- Martignon, L. und U. Hoffrage: Fast, frugal and fit: Lexicographic heuristics for paired comparison. *Theory and Decision* 52 (2002), S. 29-71.
- Martignon, L. und K.B. Laskey: Bayesian benchmarks for fast and frugal heuristics. In: G. Gigerenzer, P.M. Todd und ABC Research Group, 1999, S. 169-188.

- Mellers, B., R. Hertwig und D. Kahneman: Do frequency representations eliminate conjunction effects? An exercise in adversarial collaboration. *Psychological Science* 12 (2001), S. 269-275.
- Oppenheimer, D.M.: Not so fast! (and not so frugal!): Rethinking the recognition heuristic. *Cognition* 90 (2003), S. B1-B9.
- Pachur, T. und R. Hertwig: On the psychology of the recognition heuristic: Retrieval primacy as a key determinant of its use. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 32 (2006), S. 983-1002.
- Pohl, R.F.: Empirical tests of the recognition heuristic. *Journal of Behavioral Decision Making* 19 (2006), S. 251-271.
- Pólya, G.: Mathematik und plausibles Schließen, Bd. 1. Basel 1962 (engl. Erstveröffentlichung 1954).
- Reimer, T. und K. Katsikopoulos: The use of recognition in group decision making. *Cognitive Science* 28 (2004), S. 1009-1029.
- Richerson, P.J. und R. Boyd: Not by genes alone. Chicago 2005.
- Rieskamp, J. und U. Hoffrage: When do people use simple heuristics and how can we tell? In: G. Gigerenzer, P.M. Todd und ABC Research Group, 1999, S. 141-168.
- Serwe, S. und C. Frings: Who will win Wimbledon 2003? The recognition heuristic in predicting Sports events. *Journal of Behavioral Decision Making* 19 (2006), S. 321-332.
- Sherden, W.A.: The fortune sellers: The big business of buying and selling predictions. New York 1998.
- Simon, H.A.: Invariants of human behavior. *Annual Review of Psychology* 41 (1990), S. 1-19.
- Simon, H.A.: What is an »explanation« of behavior? *Psychological Science* 3 (1992), S. 150-161.
- Simon, H.A.: Die Wissenschaften vom Künstlichen. Wien 1990 (engl. 1969).
- Stich, S.P.: Could man be an irrational animal? *Synthese* 64 (1985), S. 115-135.
- Tomasello, M.: Do apes ape? In: B. G. Galef jr. und C. M. Heyes (Hgg.): *Social learning in animals: The roots of culture*. New York 1996, S. 319-346.
- Törngren, G. und H. Montgomery: Worse than chance? Performance and confidence among professionals and laypeople in the stock market. *Journal Behavioral Finance* 5 (2004), S. 148 ff.
- Toscani, O.: Die Werbung ist ein lächelndes Aas. Frankfurt 1997.
- Tversky, A. und D. Kahneman: Judgements of and by representativeness. In: D. Kahneman, P. Slovic und A. Tversky (Hgg.): *Judgement under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge 1982, S. 84-98.
- Tversky, A. und D. Kahneman: Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgement. *Psychological Review* 90 (1983), S. 293-315.
- Volz, K.G., L.J. Schooler, R.I. Schubotz, M. Raab, G. Gigerenzer und D.Y. von Cramon: Why you think Milan is larger than Modena: Neural correlates of the recognition heuristic. *Journal of Cognitive Neuroscience* 18 (2006), S. 1924-1936.

Zum Nach- und Weiterlesen

Gigerenzer, G.: Bauchentscheidungen. Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. München (C. Bertelsmann Verlag) 2007.

Gigerenzer G.: Risiko. Wie man die richtigen Entscheidungen trifft. München (C. Bertelsmann Verlag) 2013.

Peter von Matt

Übeltäter, trockne Schleicher, Lichtgestalten

Die Wissenschaftler in der öffentlichen Phantasie¹

Die literarische Phantasie ist ein Teil der kollektiven Einbildungskraft. Sie nährt sich ebenso sehr von den gemeinsamen Träumen der Gesellschaft wie von den privaten Träumen des einzelnen Autors. Und in gleichem Maße füttert die literarische Phantasie auch wieder das gemeinsame Phantasieren ihrer Zeit, sogar der späteren Epochen. Don Quijotes Windmühlen, Hamlet mit dem Totenschädel, Odysseus in der Höhle des Zyklopen, Robinson vor der Fußspur im Sand, die lange Nase des Pinocchio – sie sind zu Zeichen geworden, mit denen sich die Menschheit über alle Sprachen hinweg verständigt.

Auch die einzelnen Berufe werden imaginativ bearbeitet. Den dünnen Schneider und den fetten Wirt kennt schon das Märchen. Zurzeit erleben die Banker eine pittoreske Stilisierung. Kein Metier aber wurde über die Jahrhunderte hin einer intensiveren Bearbeitung durch die allgemeine, insbesondere die literarische Phantasie unterzogen als die Wissenschaften. Über ihre Vertreter, die Wissenschaftler, zirkulieren die Klischees und sind nicht auszurotten. Sie werden bald auf diese, bald auf jene Sparte angewendet, einmal mehr auf die Geistes-, dann wieder mehr auf die Naturwissenschaftler, gerne auch auf alle zusammen. Die Bilder schillern und changieren. Hier sind sie mit Verachtung unterfüttert, dort mit Verehrung. Die Spannweite ist enorm. Ungeheurer Verdacht wechselt mit großäugiger Bewunderung, Spott mit Andacht, Staunen mit schnöder Gleichgültigkeit. Zur Ruhe kommt das nie. Und so tanzt es auch über die Leinwände und Bildschirme: The Nutty Professor, Dr. Strangelove, Doktor Mabuse, Doktor Caligari, Dr. Jekyll, Victor Frankenstein – nicht zu vergessen den Doktor Faust. Der Film hat sich schon in seinen Anfängen auf das Thema förmlich gestürzt und eine Reihe von Gestalten geschaffen, die zur Mythologie des 20. Jahrhunderts gehören.

1 Genehmigter Wiederabdruck aus JB-Gespräche 23: Peter von Matt: *Der unvergessene Verrat am Mythos*. Über die Wissenschaft in der literarischen Phantasie. Basel (Verlag Schwabe) 2009.

Die Gestalt des Wissenschaftlers in der Literatur und den Künsten ist die dramatische Zuspitzung der öffentlich zirkulierenden Stereotype. Aus einem diffusen Verdacht heraus kristallisiert sich der Wissenschaftler als Verbrecher, aus landläufigem Spott der Wissenschaftler als Narr und Wahnsinniger, aus unklarem Respekt der Wissenschaftler als Heilsbringer. Nur jener Wissenschaftler, der ruhig und ausdauernd sein tägliches Pensum harter Arbeit absolviert, scheint für die Welt des Imaginären unproduktiv zu sein. Ganz frei von einem Grundverdacht bleibt allerdings auch er nicht.

Hier steckt ein Problem. Offenbar provoziert der Wissenschaftler die Menschen schon durch seine bloße Existenz. Ein beliebtes Mittel, um diese Irritation abzuleiten, ist die Metapher vom Elfenbeinturm. Sie geht Politikern wie Journalisten gleich leicht von den Lippen. So trivial sie sich ausnimmt, so aufschlussreich ist sie doch – nicht für die Wissenschaftler, wohl aber für deren Bild in der Volksseele. In seinem Ursprung ist der Elfenbeinturm ein Erotikon. Er stammt aus dem Hohenlied. »Dein Schoß ist wie ein runder Becher, dem nimmer Getränk mangelt. Dein Leib ist wie ein Weizenhaufen, umsteckt mit Rosen. Deine zwei Brüste sind wie zwei junge Rehzwillinge. Dein Hals ist wie ein elfenbeiner Turm.«² So steht es im Urtext aller Liebeslyrik. Daraus auf eine entsprechende sinnliche Attraktivität der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu schließen, wäre indessen vorschnell. Im Mittelalter wurde die *Turris eburnea* zum Mariensymbol. Das französische 19. Jahrhundert machte die *Tour d'ivoire* zu einem positiv verstandenen Begriff der Kunsttheorie: der Elfenbeinturm als Voraussetzung für die Produktion von verbindlicher Kunst. Noch Flaubert identifizierte sich damit: »*Que ne peut-on vivre dans une tour d'ivoire!*«³ Daraus entstand dann langsam die heutige abschätzige Bedeutung.

Worin besteht die therapeutische Funktion dieser populären Metapher? Sie macht die Wissenschaftler zu weltfremden Wesen, die in einem geschützten Winkel an ihren Theorien basteln, sich unverständlich ausdrücken und von der Welt, wie sie ist, so wenig Ahnung haben wie vom gesunden Menschenverstand. Aber warum ist diese Vorstellung für breite Kreise so angenehm? Von den Wissenschaften scheint eine schleichende Kränkung auszugehen, die nur zu ertragen ist durch Abwertung und Lächerlichmachen. Das ist eine Grundgegebenheit der

2 *Das Hohelied* 7.3-5.

3 An Louise Colet, 4. September 1852.

Wissenschaftsgeschichte. Erasmus von Rotterdam hat daraus in seinem *Lob der Torheit* einen ironischen Mythos gemacht. Er ließ die personifizierte Torheit von der Kanzel herunter erklären:

Einfach und arglos lebte jenes Geschlecht des Goldenen Zeitalters, ohne die Krücken der Wissenschaft, allein geleitet von seinem natürlichen Instinkt. [...] Jene Menschen waren viel zu gottesfürchtig, um in gewissenloser Neugier die Geheimnisse der Natur, die Größe, Bahn und wirkenden Kräfte der Gestirne sowie den verborgenen Urgrund aller Dinge zu erforschen, denn in ihren Augen wäre es eine schwere Sünde gewesen, wenn ein sterblicher Mensch über die ihm gesetzten Grenzen hinaus nach Wissen gestrebt hätte. [...] Als aber nach und nach die lautere Unschuld des Goldenen Zeitalters sich verflüchtigte, wurden zuerst von bösen Geistern die Wissenschaften und Künste erfunden.⁴

Die Wissenschaft als Sündenfall. Hinter der antikischen Draperie werden die alten theologischen Vorbehalte gegenüber der *Libido sciendi* sichtbar. Auch wenn Erasmus sie ironisiert – es ist ja die Torheit, die das sagt –, zeichnet sich hier doch eine Position ab, welche die Genese der Wissenschaften mit dem Versprechen der Schlange im Apfelbaum verbindet: *Eritis sicut Deus, scientes bonum et malum*. Die Wissenschaft rückt hier in die Nähe des Verbrechens, und dies befördert in der öffentlichen Phantasie die Imaginationen vom Wissenschaftler als Übeltäter. Das ist insofern merkwürdig, als der Verbrecher völlig unvereinbar erscheint mit dem weltfremden Eigenbrötler im Elfenbeinturm. Offenbar liegen da zwei verschiedene Instrumente vor, mit denen der chronischen Irritation durch die Wissenschaft fallweise begegnet wird. In den öffentlichen Debatten über die so genannte Schulmedizin, die Gentechnologie und die Stammzellenforschung zeichnet sich das Schema des Wissenschaftlers als Verbrecher oft sehr deutlich ab, während der Wissenschaftler als weltfremder Eigenbrötler in diesem Zusammenhang kaum aktualisiert wird.

Beide Klischees haben ihr ehrwürdiges Herkommen. Beide stärken das Selbstgefühl dessen, der sich ihrer bedient. Dem weltfremden Wissenschaftler ist man in der Lebenspraxis überlegen, dem verbrecherischen in der Moral. Der Locus classicus zur Weltfremdheit der Wissen-

4 Erasmus von Rotterdam: *Das Lob der Torheit*. Aus dem Lateinischen übersetzt und mit einem Nachwort von Kurt Steinmann. Zürich 2003, S. 82 f.

schaft ist die Stelle in Platons *Theaitetos*, wo Sokrates erzählt, wie Thales von Milet, einer der ersten Philosophen überhaupt, bei seinen astronomischen Studien in die Höhe starrte und dabei in einen Brunnen fiel. Eine »geistreiche und witzige thrakische Magd« habe ihn ausgelacht mit den Worten: »Du suchst zu wissen, was am Himmel ist, aber was dir vor den Füßen liegt, davon hast du keine Ahnung.«⁵ Dieses Lachen des gesunden Menschenverstandes hört man heute noch. Wobei nicht übersehen werden sollte, dass die Anekdote ihrerseits in einem philosophisch anspruchsvollen Text überliefert ist und von den Philosophen bis heute diskutiert wird. Ohne die Wissenschaft selbst wäre also das Lachen über sie folgenlos verhallt. Sokrates nennt die Frau zudem »geistreich und witzig«, nicht etwa ahnungslos und dumm. Die Wissenschaft hat ihre Noblesse. Sie versteht es, die Lächerlichmachung durch den Common sense in die strenge Reflexion aufzunehmen, während für die Lachenden der Spott nur die Funktion hat, das unklare Unbehagen angesichts der Wissenschaft zu neutralisieren.

Wenn Thales in den Brunnen stürzt und so den soliden Erdboden des Alltagsverstandes nach unten verlässt, setzt sich der Sokrates des Aristophanes in die Höhe ab. In der bösen Komödie *Die Wolken* hängt der Philosoph in einem Korb hoch oben an einem Mast, weil man nur in der Luft schwebend die Himmelsphänomene richtig sehen könne. »Ich beschreite die Luft und erforsche die Sonne«, sagt er. Die Gedanken seien mit der Luft verwandt und müssten sich daher mit ihr mischen. Der Erdboden aber lähme das Denken. Das ist der krasse Hohn des Komödiendichters auf die weltferne Wissenschaft – gedacht und gesprochen vom Erdboden aus, terre-à-terre, wie sich der Common sense ja versteht. Da es den Elfenbeinturm um 423 vor Christus noch nicht gibt, muss ein Mastkorb dafür herhalten. Aristophanes verbindet nun aber dieses Gelächter mit noch viel schärferen Attacken. Sokrates leugnet bei ihm offen die Existenz des höchsten Gottes: »Es gibt keinen Zeus.«⁶ Dafür wird im brutalen Schluss des Stücks die Denkwerkstatt des Philosophen zerstört und Sokrates selbst in den Trümmern verbrannt. Der Anführer der Attacke, der aufs Dach steigt, um die Ziegel herunterzuwerfen, ruft dabei aus: »Ich beschreite die Luft und erforsche die Sonne.« Diese groteske Hinrichtung des Sokrates auf dem

5 Vgl. *Platon's Werke*. Dritte Gruppe: Dialektische Gespräche. Übersetzt von Julius Deuschle. Zweites Bändchen: *Theaitetos*. Stuttgart 1856, S. 218.

6 Aristophanes: *Die Wolken*. Übersetzung, Nachwort und Anmerkungen von Otto Seel. Stuttgart 1963, S. 27.

Theater, die den Atheismus-Vorwurf untermauerte, wirkte sich später im tatsächlichen Prozess gegen den Philosophen verheerend aus. Sokrates musste sterben. Im Ablauf der Komödie aber hat sich der Topos vom weltfremden Wissenschaftler unheimlich rasch in den Topos vom Wissenschaftler als Verbrecher verwandelt.

Daraus ist zu lernen: Wo die Wissenschaften oder einzelne Disziplinen durch das Klischee von ihrer Weltfremdheit abgewertet werden, sind praktische Folgen nie ausgeschlossen. So ist etwa die Lächerlichmachung der Geisteswissenschaften in Politik und Öffentlichkeit oft genug das Vorspiel zur Abschaffung von Lehrstühlen und ganzen Fächern.

Es gibt ein breites Band von Zusatzklischees, in denen die angebliche Skurrilität der Wissenschaft, der Narr im Elfenbeinturm, literarisch ausgemalt und ausgekostet wird. Am banalsten ist der zerstreute Professor. Jeder kennt das Witzmotiv. Aber in einem Campus-Roman wie Vladimir Nabokovs *Pnin* wird das Stereotyp plötzlich lebendig und tritt vor uns hin in der Gestalt eines unvergesslichen, ergreifend-komischen Menschen. Bei diesem Pnin könnte man auch ansetzen, wenn es um ein weiteres Zusatzklischee geht: den Kampf mit dem Manuskript. Dieser verdiente ein eigenes Forschungsvorhaben. Erasmus hat auch hier vorgearbeitet und den Wissenschaftler am Schreibtisch geschildert, wie

er sich endlos abquält; er flickt in den Text ein, ändert ihn, streicht, macht die Streichung rückgängig, fängt wieder von vorne an, schreibt um, stellt das Erscheinen des Buches in Aussicht, hält es bis zum Druck neun Jahre zurück – und ist doch mit dem Ergebnis niemals zufrieden.⁷

Jeder von uns kennt solche Komödien bei Bekannten und Studierenden. Sie verwandeln sich oft genug in Tragödien. Thomas Bernhard hat einen seiner berühmtesten Romane, *Das Kalkwerk*, um genau diese Langzeitkatastrophe geschrieben. Hier sitzt ein Forscher an einer Studie über das Gehör, jahrzehntelang. Er hat sie genau im Kopf und ist doch nicht fähig, ein einziges Wort aufs Papier zu bringen. Wie Sisyphos den Stein wälzt, täglich, endlos, setzt sich der Mann täglich an seinen Schreibtisch, ergreift die Feder und legt sie wieder hin, endlos. Zuletzt erschießt er seine Frau und wird, mit seiner fertigen Studie

7 Erasmus: Lob der Torheit. A. a. O., S. 140f.

im Kopf, ins Zuchthaus oder ins Irrenhaus gebracht. Ein Verbrecher? Ein Wahnsinniger? Wer soll es entscheiden? In Bernhards Prosa aber gewinnt die sisyphontische Repetition eine verzehrende Musikalität. Das sinnlose Tun wird zum reinen Rhythmus, einem Bolero aus Sprache über die Unmöglichkeit, zur Sprache zu kommen.

Zu den Zusatzklischees gehören auch die Berichte über die körperliche Verfassung der skurrilen Wissenschaftler. Erasmus nimmt hier ebenfalls kein Blatt vor den Mund. In der Fortsetzung des Zitats über die Leiden am Manuskript schreibt er: »Dazu kommt die Zerrüttung der Gesundheit, Verkümmern der äußeren Gestalt, Entzündung der Augen oder gar Blindheit, Armut, Neid, Rückzug von allen Vergnügungen, vorzeitige Vergreisung, früher Tod und ähnliche Geschenke.«⁸ Das Spannungsfeld zwischen den Taten des Geistes und der Beschaffenheit des Körpers, in dem dieser Geist wohnt, ist für die literarische Phantasie nahezu unerschöpflich. Auch durch die Philosophiegeschichte zieht sich der Topos; man denke nur an die vielen Anekdoten über Kant. Der jüngste Meisterstreich auf diesem Feld ist Daniel Kehlmanns Roman *Die Vermessung der Welt*.⁹ Wie der ins Groteske gewendete Märtyrer eines Barockdramas verachtet darin der Wissenschaftler Alexander von Humboldt zum Vergnügen der Leserinnen und Leser alle Ansprüche und Nöte seines Leibes, die das Auseinanderdriften von Geist und Körper ebenso komisch finden wie die thrakische Magd den Sturz des Philosophen in den Brunnen und die Athener seine Auffahrt im Mastkorb. Das betrifft übrigens auch das Liebesleben im Elfenbeinturm, womit ein weiteres Zusatzklischee wenigstens angedeutet sei. Kehlmanns Roman ist in dieser Hinsicht ausgesprochen ertragreich. Wer es noch drastischer möchte, kann zu Houellebecqs Roman *Elementarteilchen*¹⁰ greifen.

Dem Wissenschaftler, so ist festzustellen, eignet in der öffentlichen Phantasie eine eigentümliche Dezentriertheit. Sie verunsichert, wirkt komisch und macht aggressiv. Sie bemisst sich nach dem Abstand des theoretischen Denkens vom Common sense. Der gesunde Menschenverstand betrachtet sich als die demokratische Gestalt der Theorie. Er stützt sich ja tatsächlich auf die Mehrheit. In Wahrheit aber ist er selbst dogmatisch, weil er sich stets von vornherein im Besitz der Resultate glaubt.

8 Vgl. Erasmus: *Lob der Torheit*. A. a. O., S. 141.

9 Daniel Kehlmann: *Die Vermessung der Welt*. Reinbek bei Hamburg 2005.

10 Michel Houellebecq: *Les particules élémentaires*. Paris 1998.

Es gibt wohl kein Werk der Weltliteratur, in dem das große Spektakel, zu dem die Wissenschaft und die Wissenschaftler in der öffentlichen Phantasie unentwegt aufgeboten werden, vollständiger in Erscheinung träte als Goethes *Faust*. Das Werk entsteht über Jahrzehnte hin, und diese Jahrzehnte sind zugleich die Durchbruchszeit der modernen Naturwissenschaften. Was das heißt, kann man etwa an dem Kulturschock abmessen, den die Vernichtung der alten vier Elemente durch die neue Chemie darstellte. Woraus sich jahrhundertlang die Welt zusammengesetzt hatte, Wasser, Feuer, Erde, Luft, das verdampfte in den neuen Labors zu einem Kindermärchen. Die ehrwürdige Vierheit kehrte zwar auf allen esoterischen Kanälen rasch wieder zurück und hält sich dort bis heute. Aber der Riss zwischen dem Elementaren als einer unmittelbaren Erfahrung und als einer mathematischen Formel sollte sich nie mehr schließen. Als 1789 Lavoisiers *Traité Élémentaire de Chimie* in Paris erscheint, das Werk, mit dem die Alchemie als Wissenschaft endgültig verabschiedet wird, sitzt Goethe in Weimar an der Umarbeitung des *Urfaust* in die Fassung *Faust. Ein Fragment*. Darin wird zwar nicht die aktuelle Naturwissenschaft diskutiert, wohl aber eine so radikale Krisenerfahrung aller Wissenschaften in Szene gesetzt, dass man einen untergründigen Bezug zum gleichzeitigen Kollaps der alten Naturlehre nicht ausschließen darf.

Auf dem Osterspaziergang, den Faust mit seinem Famulus Wagner unternimmt, inszeniert Goethe eine verblüffende Überblendung des Wissenschaftlers als Lichtgestalt mit dem Wissenschaftler als Verbrecher. Faust wird vom Volk verehrt und wie ein Erlöser umdrängt. Wagner, nach heutigen Begriffen etwa sein Oberassistent, registriert es nicht ohne Neid, wenn er sagt:

Welch ein Gefühl mußt du, o großer Mann!
Bei der Verehrung dieser Menge haben! [...]
Der Vater zeigt dich seinem Knaben,
Ein jeder fragt und drängt und eilt,
Die Fiedel stockt, der Tänzer weilt.
Du gehst, in Reihen stehen sie,
Die Mützen fliegen in die Höh':
Und wenig fehlt, so beugten sich die Knie,
Als käm' das Venerabile.«¹¹

11 Johann Wolfgang Goethe: *Faust*. Texte. Hrsg. von Albrecht Schöne. Frankfurt a. M. 1994, Vers 1011-1021.

Wie vor dem Allerheiligsten also will das Volk vor Faust in die Knie sinken. Das ist die bedingungslose Verehrung des Arztes und Wissenschaftlers. Skepsis und Spott sind undenkbar. Dieser Verklärung zur öffentlichen Kultfigur macht Faust selbst ein Ende, indem er sich vor Wagner als Massenmörder bekennt, der einst mit seinem Vater zusammen Tausende umgebracht hat. Die Germanistik geht über diese Stelle meistens rasch und etwas betreten hinweg. Fausts Vater war Alchimist. In seiner »schwarzen Küche« braute er Heilmittel, die er mit dem Sohn zusammen im Volk verteilte. Angesichts der Huldigung durch die Menge bricht die Selbstanklage aus Faust förmlich heraus:

Hier war die Arznei, die Patienten starben,
Und niemand fragte: wer genas?
So haben wir, mit höllischen Latwergen,
In diesen Tälern, diesen Bergen,
Weit schlimmer als die Pest getobt.
Ich habe selbst den Gift an Tausende gegeben,
Sie welkten hin, ich muß erleben,
Daß man die frechen Mörder lobt.¹²

Wagner findet das nicht weiter schlimm. Er braucht dafür ein Argument, zu dem auch andere Massenmörder gerne greifen: den Gehorsam des Untergebenen:

Wie könnt ihr euch darum betrüben!
Tut nicht ein braver Mann genug,
Die Kunst, die man ihm übertrug,
Gewissenhaft und pünktlich auszuüben.¹³

Die Stelle ist brisant, wenn man an die tatsächlichen Morde um der Wissenschaft willen im 20. Jahrhundert denkt und an ihre spätere Rechtfertigung durch höheren Befehl. So sehr die literarische Phantasie dazu neigt, schrille Klischees auf die Wissenschaftler zu projizieren, sie deckt dabei doch auch bedrohliche Wirklichkeiten auf. Das hängt zusammen mit dem noch unklaren Ursprung dieser intensiven Klischeeproduktion.

Die Klischees selbst haben eine merkwürdige Eigendynamik. Sie neigen dazu, von der einen Ausprägung in die andere umzuschlagen.

12 Goethe: *Faust.*, Vers 1048-1055.

13 Goethe: *Faust.*, Vers 1056-1059.

Bei Aristophanes kippte der weltfremde Philosoph in den verbrecherischen Gottesleugner. Bei Fausts Osterspaziergang kippt die Lichtgestalt in den Massenmörder. Die Denkbilder müssen also untergründig miteinander verknüpft sein. Gelegentlich kann diese Dynamik sogar zum Zentrum einer Geschichte werden. So geschieht es etwa in Stevensons Erzählung *Dr. Jekyll und Mr. Hyde*, wo sich der angesehene und beliebte Chemiker Jekyll durch eine von ihm entdeckte Mixtur in einen Meuchelmörder verwandelt, der alles Böse, wozu Menschen fähig sind, auslebt, um dann mit Hilfe eines Gegenmittels wieder in seine anständige Existenz zurückzukehren. Die Story ist reißerisch, aber sie lebt von dem unausrottbaren Misstrauen gegenüber der Wissenschaft, dass sie nämlich um der Erkenntnis willen bereit sei, aus der moralischen und religiösen Ordnung der Welt herauszutreten. Der mittelalterliche Spruch *Tres medici, duo athei* ist die kürzeste Formel für diesen alten Argwohn.

Faust, der Doktor, spaltet sich von Wagner ab und koaliert dafür mit dem Teufel. Diese Trennung von Wagner bedeutet die Befreiung von einer Wissenschaft, die einem der geläufigsten Klischees entspricht: Forschung als abgesperrtes Treiben, lebensfern und lebensfremd, im Turm eben, sei er nun aus Backstein oder aus Elfenbein. Faust droht daran zu ersticken. Wagner hingegen identifiziert sich damit vorbehaltlos und wird deshalb von Faust unverblümt als »trockner Schleicher«¹⁴ bezeichnet. Die Zuschauer sind natürlich auf Seiten Fausts; denn so, wie er in seinem Anfangsmonolog über sämtliche Fakultäten herfällt, haben sie es sich eigentlich auch immer irgendwie gedacht. Faust verachtet alle Bücher und alle Instrumente, verachtet die Aufteilung in Fächer und Disziplinen. Er will das Eine und das Ganze und sofort. Zweimal beschreibt er sein Arbeitszimmer. Jedes Mal sieht er nur Staub, Schimmel und vergilbte Papiere. Die Bücher sind so sinnlos wie die technischen Geräte. Was steht denn in den Scharteken?

Soll ich vielleicht in tausend Büchern lesen,
Daß überall die Menschen sich gequält,
Daß hie und da ein Glücklicher gewesen? –¹⁵

Für die Erkenntnis des Wesentlichen, heißt das, brauche ich keine Bücher. Ähnlich betrachtet er die Instrumente des Labors:

14 Goethe: *Faust.*, Vers 521.

15 Goethe: *Faust.*, Vers 661–663.

Ihr Instrumente freilich, spottet mein,
Mit Rad und Kämmen, Walz' und Bügel.
Ich stand am Tor, ihr solltet Schlüssel sein;
Zwar euer Bart ist kraus, doch hebt ihr nicht die Riegel.¹⁶

Um das Tor zur Erkenntnis der Natur zu öffnen, bedarf es also keiner technischen Vorrichtungen. Die Natur kann und muss sich dem Menschen unmittelbar aufschließen. Sonst bleibt alle Mühe vergeblich:

Und was sie deinem Geist nicht offenbaren mag,
Das zwingst du ihr nicht ab mit Hebeln und mit Schrauben.¹⁷

Das ist zwar vielleicht der Anfang der deutschen Romantik, aber gewiss nicht der Stand der Naturwissenschaften am Ende des 18. Jahrhunderts. Die Revolutionen im Bereich der Chemie und Elektrizität, der Erdgeschichte und der Vermessung, der Ballonfahrt und der Dampfmaschine wären ohne die immer raffinierteren Instrumente nicht möglich gewesen. Und ohne die immer zahlreicheren Bücher hätte es auch keine neue Philologie gegeben, keine systematische Bibelforschung und keine historische Quellenkritik. Faust sprengt zwar den Kerker einer alten Wissenschaft, doch was er ihr entgegensetzt, geht über einen ungeheuren Enthusiasmus nicht hinaus. Wohingegen Wagner, der Bücherwurm und Freund der Apparate, tatsächlich einen künstlichen Menschen verfertigt, ein munteres Kerlchen mit losem Maul. Als der vom Teufel auch erotisch erweckte Faust in die Welt ausschwärmt, wird zuhause wahrhaftig dieser Wagner die akademische Sensation. Mephisto beschreibt ihn in seiner Glorie – wir aber stehen vor dem Phänomen, dass erneut ein Klischee in das andere kippt: diesmal der trockne Schleicher in die Lichtgestalt. Mephisto:

Doch euer Meister das ist ein Beschlagner:
Wer kennt ihn nicht den edlen Doktor Wagner,
Den ersten jetzt in der gelehrten Welt!
Er ist's allein der sie zusammenhält,
Der Weisheit täglicher Vermehrer.
Allwißbegierige Horcher, Hörer
Versammeln sich um ihn zu Hauf.
Er leuchtet einzig vom Katheder;

16 Goethe: *Faust.*, Vers 668-671.

17 Goethe: *Faust.*, Vers 674-675.

Die Schlüssel übt er wie Sankt Peter,
Das Untre so das Obre schließt er auf.
Wie er vor allen glüht und funkelt,
Kein Ruf, kein Ruhm hält weiter stand;
Selbst Faustus Name wird verdunkelt,
Er ist es, der allein erfand.¹⁸

Zugegeben, es klirrt ironisch in dieser Rede des Teufels. Aber dadurch wird erst deutlich, wie herrlich hier ein Klischee inszeniert wird, das Phantasma vom Wissenschaftler als strahlender Leitfigur. Das inner-universitäre Seelenleben bedarf dessen erfahrungsgemäß ebenso wie die breite Öffentlichkeit. Wird eine Lichtgestalt gestürzt, steht sofort die nächste auf dem Sockel. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen hat auch eine theatralische Seite, und die strenge Suche nach der Wahrheit, so säkular sie immer daherkommt, braucht offensichtlich ihre Sibyllen und Propheten. Weil aber in jedem der zirkulierenden Klischees auch die andern stecken und plötzlich akut werden können, verwandelt sich manche Lichtgestalt für neue Studentengenerationen in den trocknen Schleicher. Sogar dies wird uns im *Faust* vorgeführt. Das schüchterne Studentlein aus dem ersten Teil kehrt nämlich im zweiten als stolzer Baccalaureus zurück und liest dem einst verehrten Lehrer die Leviten:

Anmaßlich find' ich daß zur schlechtesten Frist
Man etwas sein will, wo man nichts mehr ist.
Des Menschen Leben lebt im Blut, und wo
Bewegt das Blut sich wie im Jüngling so? [...]
Hat einer dreißig Jahr vorüber,
So ist er schon so gut wie tot.
Am besten wär's euch zeitig totzuschlagen.¹⁹

Diese Aggressivität ist komisch und unheimlich zugleich. Komisch, weil der junge Mann nicht merkt, dass ihm gegenüber der verkleidete Teufel sitzt; unheimlich, weil die Wissenschaft in der öffentlichen Phantasie tatsächlich sehr rasch zu einem Aggressionsziel werden kann. Erkenntnisse, die dem Common Sense entgegenlaufen, Wahrheiten, die den Mainstream einer Zeit aufstören, sind für ihre Verkünder immer gefährlich. Jede Epoche hält sich selbst für die bisher aufgeklärteste und

18 Goethe: *Faust.*, Vers 6642-6655.

19 Goethe: *Faust.*, Vers 6774-6789.

will nicht sehen, dass es auch in ihren Tagen Erkenntnisse gibt, die man öffentlich nicht aussprechen darf. Faust ist in dieser Hinsicht allerdings illusionslos. Er will zur innersten Wahrheit der Welt vorstoßen, weiß aber genau, dass die Wahrheit nicht nur frei macht, wie es in *Johannes* 8.32 heißt, sondern auch aufs Schafott führen kann: »Wer darf das Kind beim rechten Namen nennen?«, sagt er zu Wagner, und fährt fort:

Die wenigen, die was davon erkannt,
Die töricht g'nug ihr volles Herz nicht wahrten,
Dem Pöbel ihr Gefühl, ihr Schauen offenbarten,
Hat man von je gekreuzigt und verbrannt.²⁰

Zu dem illusionären System, das die Klischees über die Wissenschaft insgesamt bilden, gehört auch die Ahnungslosigkeit darüber, wie rasch Volk und Regierung bereit sind, gegen Wahrheiten vorzugehen, die nicht wahr sein dürfen.

Übeltäter, trockne Schleicher, Lichtgestalten – die öffentliche Phantasie beschränkt sich in ihrer Beschäftigung mit den Wissenschaften keineswegs auf diese anthropologische Trias. Es gibt mancherlei Übergänge in andere Ausprägungen. Eine der spektakulärsten ist der Wissenschaftler als Wahnsinniger, der im Zusammenhang mit Thomas Bernhard kurz gestreift wurde. Mit dem wahnsinnigen Wissenschaftler verbindet sich auffällig oft die Vorstellung von Großkatastrophen, ja vom technisch inszenierten Weltuntergang durch Massenverbrennung oder Massenvergiftung. Er ist meist ein Genie, insofern mit der Lichtgestalt verwandt, aber auch ein Verbrecher von entsprechendem Zuschnitt. Als gefallenes Genie erinnert er an Luzifer. Im Film tauchte er zur Zeit der faschistischen Machtergreifung auf – so etwa Dr. Mabuse –, dann wieder in den Jahren des drohenden Atomkriegs – man denke an Dr. Strangelove in Stanley Kubricks legendärem Film. Am Schluss von Dürrenmatts Komödie *Die Physiker* reißt die wahnsinnige Ärztin Mathilde von Zahnd das Wissen der drei größten Wissenschaftler ihrer Zeit an sich und macht sich damit an die Weltherrschaft und die Weltvernichtung. Mit ihr taucht endlich einmal eine Frau unter all den Phantasiegeburten auf.

Der Wahnsinn als Konsequenz einer freigesetzten Wissenschaft und die Weltvernichtung als Konsequenz einer schrankenlosen Forschung, sie bilden zusammen eine drastische Traumsequenz der kollektiven

20 Goethe: *Faust.*, Vers 590–593.

Phantasie. Die Totalität des Erkennens schlägt darin um in die Totalität der Zerstörung. Künstlerisch lässt sich das nur in den Grenzzonen zur Trivialität und zu populären Gattungen verwirklichen.²¹ Aber da die Literatur ja nicht die Welt abbildet, sondern mit Hilfe von Geschichten und Gestalten über die Welt nachdenkt, geht es nicht darum, den Realitätsgehalt dieser Traumsequenz zu überprüfen, sondern die darin versteckte Denkleistung.

Im Zusammenfall von Wissen und Wahnsinn spricht sich der tiefste Verdacht gegen die Wissenschaft aus. Mit der Loslösung von der soliden Achse des Common Sense sind die Wissenschaften in die Gewalt zentrifugaler Kräfte geraten, die sie immer weiter wegtragen von dem, was alle Menschen gemeinsam wissen und gemeinsam verstehen. Die Sprache der Wissenschaften wird unverständlich wie einst zu Babylon, und zwar nicht nur für den Mann auf der Straße, sondern auch für die Disziplinen und Fakultäten untereinander. Das Wissen der Menschheit wächst strahlenförmig in allen Richtungen, rast in den Weltraum, weg von der Mitte, die dafür immer leerer wird. Je besser das Einzelne erkannt wird, umso ahnungsloser stehen wir dem Ganzen gegenüber. Genau das war der Schock, den Faust erlebte, als er begriff, dass die Einzelwissenschaften sich nie zu der großen Einheit fügen werden, die der herrlich geschlossenen Weltdeutung des alten Mythos, der Religion und Magie, vollgültig gegenüberstehen und sie tatsächlich ablösen könnte. Auf diese zu verzichten, sind die Menschen nämlich nicht bereit. Sie wollen, sie wünschen, sie suchen die Deutung des Ganzen, und diese ist nur im Mythos möglich. Sie belächeln zwar die vielen abgestorbenen Mythen, vom mythischen Denken selbst aber werden sie sich nie verabschieden, sowenig wie von der Magie. Der Mythos redet von der Stiftung des Ganzen, sei es im ersten Schöpfungswort, sei es im *Hierogamos*, und dieser Anfang enthält alles Spätere und auch das Ende von allem. Das schafft die Wissenschaft nie, und deshalb steht sie immer im Verdacht. Als Ganzes kann die Welt nur mythisch gedeutet werden, in einem Akt des Glaubens. Die Wissenschaft vermag das nicht, denn sie beruht auf dem Bewusstsein ihrer eigenen Grenzen. Die Demut des Nichtwissens ist seit Sokrates ihre Voraussetzung. Zwar versucht sie

21 Eine Initialzündung war Edgar Allan Poes Erzählung *The System of Doctor Tarr and Professor Feather* von 1845. Hier erscheint erstmals der Irrenarzt selbst als Wahnsinniger, der die Wärter seiner Klinik zu Verrückten erklärt und die Verrückten zu Wärtern.

den Spagat immer wieder. Sie schickt dafür die eine oder andere Lichtgestalt aufs Katheder, die mit Totalentwürfen operiert oder eine Überwissenschaft ankündigt, in der dann eines Tages alle andern Wissenschaften aufgehoben sein würden. Aber das hält nie lange vor, und schon bald liegt der falsche Pakt der Wissenschaft mit dem mythischen Denken auch hier zutage.

Die seltsamen Gestalten, in denen die öffentliche Phantasie über die Wissenschaft nachdenkt, diese Verbrecher und trocknen Schleicher, diese Wahnsinnigen und Lichtgestalten, führen ein zähes Leben. Aber was geht dieses ganze Spektakel die konkreten Wissenschaftler an? Jede Wissenschaftlerin und jeder Wissenschaftler weiß, dass diese öffentlichen Phantasien mit der eigenen täglichen Arbeit nichts zu tun haben. Der besondere Steinbruch, in dem jede und jeder beschäftigt ist, bleibt ja mit seiner Müh' und Not, seinen vielen Zweifeln und gelegentlichen Glücksgefühlen sogar den Kollegen weitgehend unbekannt. Was sollte davon erst die Öffentlichkeit wissen? Fast nichts weiß sie, und mehr will sie auch nicht wissen. Die zirkulierenden Klischees, von denen hier die Rede war, verschleiern die Einsamkeit, in der die meisten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten. In kleinsten Schritten erweitern sie die Kenntnis der Welt und des Menschen. Sie fallen dabei in keine Brunnen und sitzen in keinen Mastkörben, sie verdorren nicht, werden nicht wahnsinnig, planen keinen Weltuntergang und strahlen nicht auratisch in allen Farben des Regenbogens. Sie fahren vielmehr abends mit der Straßenbahn nach Hause und lesen dabei noch ein Separatum. Dennoch sind sie Delegierte der Menschheit. Abgeordnete sind sie der unzählbaren Neugier des *Homo sapiens* auf sich selbst. Kein schlechtes Amt – dafür sollten sich einige Gemeinplätze ertragen lassen.

Die Autoren

Martin Baumgarten, geboren 1958 in Berlin, studierte dort Chemie und Physik und promovierte 1988 im Fach organische Chemie an der Freien Universität Berlin. Nach einem Aufenthalt an der Universität Princeton/USA wurde er 1990 Projektleiter am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung im Forschungsbereich Synthetische Chemie. 1996/97 habilitierte er sich, 2010 wurde er zum Professor ernannt. Er lehrt an der Universität Mainz.

Gerd Gigerenzer, geboren 1947 in Wallersdorf, studierte, promovierte und habilitierte sich in Psychologie an der Universität München. Seit 1997 ist er Direktor am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin sowie des 2009 in Berlin gegründeten Harding-Zentrums für Risikokompetenz. Zuvor war er u.a. Professor an der *University of Chicago* und *Visiting Professor* an der *School of Law* der Universität von Virginia. Darüber hinaus ist er *Batten Fellow* der *Darden Business School* der Universität von Virginia sowie Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina.

Gerd Gigerenzer hat zahlreiche Preise erhalten, darunter den Preis der *American Association for the Advancement of Science* (AAAS) für den besten Zeitschriftenaufsatz in den Verhaltenswissenschaften und den Preis der *Association of American Publishers* für das beste Buch in den Sozialwissenschaften. Er ist Ehrendoktor bzw. Honorarprofessor an Universitäten in Berlin, Basel und Heerlen/Niederlande. Seine Sach- und Fachbücher wurden in 18 Sprachen übersetzt.

Gerhard Gottschalk, geboren 1935 in Schwedt/Oder, studierte Chemie und Biologie in Berlin und Göttingen, promovierte und habilitierte sich in Göttingen. Als Postdoktorand arbeitete er in den USA am *Department of Biochemistry, University of California, Berkeley*. Von 1970 bis zu seiner Emeritierung 2003 war er Inhaber des Lehrstuhls für Mikrobiologie an der Universität Göttingen. Er war Rektor der Göttinger Universität und Präsident mehrerer Wissenschaftsorganisationen. 1997 gründete er das Göttinger Laboratorium für Genomanalyse (G2L). Dort wurden die Genome von bislang mehr als einhundert Mikroorganismen entschlüsselt.

Mehrfach wurde Gerhard Gottschalk ausgezeichnet, u.a. mit dem Philip-Morris-Forschungspreis (1992), dem Emil von Behring-Preis der Stadt Marburg (2006), dem IBN-Award 2010 und den Ehrendoktorwürden der Slowakischen Akademie der Wissenschaften (1999) und der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock (2013). Er ist Ehrenmitglied der *Israel Society for Microbiology* (seit 1996) und der Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie VAAM (seit 2012).

Jean-Marie Lehn, geboren 1939 in Rosheim/Frankreich, studierte und promovierte an der Universität Strasbourg. 1970 wurde er dort Professor, 1979 zusätzlich am *Collège de France* in Paris. Forschungsaufenthalte und Gastprofessuren führten ihn u.a. an die Harvard Universität, die ETH Zürich und die Universitäten von Cambridge, Barcelona, Frankfurt und Oxford. 1987 erhielt er mit Donald Cram und Charles Pedersen den Nobelpreis für Chemie für seine Arbeit im Forschungsfeld der Supramolekularen Chemie. An der Universität Strasbourg gründete er 2002 das ISIS (*Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires*). Sein Lebenswerk umfasst rund 800 Publikationen. Für seine Verdienste erhielt er neben dem Nobelpreis zahlreiche Ehrendoktorwürden und Ehrenprofessuren sowie internationale Preise und Auszeichnungen, z.B. 1983 den Humboldt-Forschungspreis.

Peter von Matt, geboren 1937 in Luzern/CH, studierte Germanistik, Anglistik und Kunstgeschichte in Zürich und England, promovierte 1964 und habilitierte sich 1970 über E. T. A. Hoffmann. Als Professor für Neuere Deutsche Literatur lehrte er 1976 bis 2002 an der Universität Zürich, war als Gastprofessor an der *Stanford University*/USA und Fellow am Wissenschaftskolleg zu Berlin. Er wirkt als Essayist und Buchautor zur Literatur- und Kulturgeschichte.

Zahlreiche Auszeichnungen honorieren Peter von Matts Werk, darunter der Johann-Heinrich-Merck-Preis für literarische Kritik und Essay der Deutschen Akademie für Sprache und Dichtung (1991), die Aufnahme in den Orden *Pour le mérite* für Wissenschaften und Künste (1996), der *Prix Européen de l'Essai Charles Veillon* (2002), der Heinrich-Mann-Preis der Akademie der Künste Berlin (2006), der Brüder-Grimm-Preis der Universität Marburg (2007) und der Schweizer Buchpreis (2012).

Klaus Müllen, geboren 1947, studierte Chemie in Köln. Er promovierte 1972 in Basel und habilitierte sich 1977 an der ETH Zürich. 1979 folgte er dem Ruf auf eine Professur für organische Chemie an die Universität Köln, 1983 an die Universität Mainz. 1989 wurde er Direktor des Forschungsbereichs Synthetische Chemie am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung. Er verfasste über 1.500 Publikationen und hält 80 Patente; ehemalige Mitarbeiter sind als Professoren oder in leitenden Positionen bei namhaften Chemieunternehmen tätig.

Klaus Müllen erhielt Forschungspreise, Ehrendoktorwürden und Ehrenprofessuren im In- und Ausland, z.B. 1993 den Max-Planck-Forschungspreis, 1997 den Philip-Morris-Forschungspreis, 2011 den *ACS Award in Applied Polymer Science*, 2012 den *BASF Award for Organic Electronics* sowie Ehrendoktorwürden und -professuren in Sofia, Karlsruhe Shanghai, Peking und Changchun/China. Er ist Mitglied bzw. Ehrenmitglied von Akademien und Fachgesellschaften weltweit.

Eva-Maria Neher, geboren 1950 in Mülheim an der Ruhr, studierte Mikrobiologie und Biochemie an der Universität Göttingen. Nach ihrer Promotion erhielt sie ein Post-doc-Stipendium am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie und wechselte danach an die Medizinische Fakultät der Universität Göttingen. Nach einer mehrjährigen Familienpause erteilte Eva-Maria Neher an der Freien Waldorfschule Göttingen Experimentalunterricht in Biologie und Chemie und entwickelte das wissenschaftlich-didaktische Konzept zur EXPO-Ausstellung »Faszination Pflanzenzüchtung«. Sie ist Gründerin des XLAB – Göttinger Experimentallabor für junge Leute, dessen Leitung und Geschäftsführung sie seit 2000 innehat.

Für ihr Engagement für die naturwissenschaftliche Bildung wurde ihr 2007 der Niedersächsische Staatspreis verliehen. 2009 erhielt sie eine Honorarprofessur der Fakultät für Chemie an der Universität Göttingen und 2013 das Bundesverdienstkreuz 1. Klasse.

Arnulf Quadt, geboren 1969 in Troisdorf, studierte Physik und Mathematik an der Universität Bonn. Zur Promotion (1997) wechselte er an die *University of Oxford* und später ans CERN, das europäische Kernforschungsinstitut in Genf (1999–2001).

Ein Feodor-Lynen-Forschungsstipendium der Alexander-von-Humboldt-Stiftung und ein Heisenberg-Stipendium ermöglichten ihm Aufenthalte an der *Rochester University/USA*, am amerikanischen Kern-

forschungszentrum *Fermilab* und am MPI für Physik in München. Seit der Habilitation in Bonn 2006 ist er Professor für Teilchenphysik in Göttingen und als solcher beteiligt am ATLAS-Experiment am CERN (Elementarteilchen: Higgs-Boson, Top-Quarks) und am D0-Experiment am *Fermilab* (Elementarteilchen: Top-Quarks). Die Entdeckung des jahrzehntelang vorausgesagten und gesuchten Higgs-Bosons im ATLAS-Experiment ging 2012 durch die Medien.

Stefan Rahmstorf, geboren 1960 in Konstanz, studierte Physik in Ulm und Konstanz und physikalische Ozeanographie an der *University of Wales* (Bangor). Er promovierte in Ozeanographie an der *Victoria University of Wellington*/Neuseeland. Dabei nahm er an mehreren Forschungsfahrten im Südpazifik teil. Stationen seiner Laufbahn als Wissenschaftler waren das *New Zealand Oceanographic Institute*, das Institut für Meereskunde in Kiel und seit 1996 das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Dort erforscht er vor allem die Rolle der Meere bei Klimaänderungen. Seit 2000 lehrt er als Professor im Fach Physik der Ozeane an der Universität Potsdam.

1999 wurde Stefan Rahmstorf von der amerikanischen McDonnell-Stiftung mit einem Förderpreis in Höhe von einer Million Dollar ausgezeichnet. Rahmstorf diente von 2004–2013 im Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) und ist Mitglied in der *Academia Europaea*. Er war zudem einer der Leitautoren des 4. IPCC-Berichts. 2007 wurde er zum *Honorary Fellow* der *University of Wales* ernannt, 2010 zum Fellow der *American Geophysical Union*.

Marina V. Rodnina studierte Biologie und promovierte in Kiew/Ukraine, in Molekularbiologie und Genetik. Als Forschungsstipendiatin der Alexander-von-Humboldt-Stiftung kam sie 1990 an die Universität Witten/Herdecke, wo sie sich 1997 im Fach Biochemie habilitierte. 1998 wurde sie Professorin, 2000 Lehrstuhlinhaberin für Physikalische Biochemie an der Universität Witten/Herdecke. Seit 2008 leitet sie als Direktorin die Abteilung Physikalische Biochemie am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie.

Sie ist gewähltes Mitglied der *European Molecular Biology Organization* (EMBO, 2004) und der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2008).

Randolf Schücke, geboren 1976, studierte Chemie in Kyoto/Japan und in Mainz. Zur Promotion wechselte er 2005 an das Max-Planck-Institut für Polymerforschung in die Arbeitsgruppe von Professor Klaus Müllen. Heute arbeitet er als Lehrer an der naturwissenschaftlich-technischen berufsbildenden Paul-Ehrlich-Schule in Frankfurt a.M. und unterrichtet dort unter anderem in der Fachschule für Chemietechnik.

Walter Steurer, geboren 1950 in Wien, studierte Chemie und promovierte dort und habilitierte sich 1987 in München im Arbeitsgebiet Kristallographie und Mineralogie. Nach einer Station in Hannover ist er seit 1993 Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich und leitet dort das Laboratorium für Kristallographie. Quasikristalle sind eines der Forschungsgebiete seiner Arbeitsgruppe.

Preise und Auszeichnungen waren 1990 der Victor-Moritz-Goldschmid-Preis der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG) und 2008 der *Jean Marie Dubois Award for Excellence in Quasicrystal Research*, vergeben von der Internationalen Konferenz für Quasikristalle und der *Iowa State University Alumni Foundation*.

Jürgen Tautz, geboren 1949 in Heppenheim, studierte an der Technischen Universität Darmstadt Biologie, Geographie und Physik und promovierte 1977 an der Universität Konstanz, wo er sich nach Forschungsaufenthalten in Canberra/Australien und an der *Stanford University/USA* in Zoologie habilitierte. Seit 1990 ist er Professor am Biozentrum der Universität Würzburg und leitet dort die BEEgroup. Er entwickelt und leitet dort seit 2006 das interdisziplinäre Projekt *HOneyBee Online Studies* (HOBOS), eine internetbasierte Lehr- und Lernplattform für Schüler, Studierende und Lehrer.

Für seine populärwissenschaftlichen Darstellungen und für HOBOS wurde Jürgen Tautz mehrfach ausgezeichnet, z.B. von der EMBO als einer der besten Wissenschaftskommunikatoren Europas und von der DFG und dem Stifterverband mit dem Communicator-Preis 2012.

Wolfgang Wintermeyer studierte Chemie, promovierte und habilitierte sich 1979 an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Mit einem Heisenberg-Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft setzte er von 1982-1987 seine Forschung fort. 1987 folgte er dem Ruf auf den Lehrstuhl für Molekularbiologie an die Private Universität Witten/Herdecke, wo er auch als Dekan der Fakultät für Biowissenschaften

(von 1991 bis 2007) und als Sprecher der Geschäftsführung (2004) wirkte. Seit der Emeritierung 2009 leitet er als *Max Planck Fellow* die Forschungsgruppe *Ribosome Dynamics* am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie.

Janina Zimmermann, geboren 1981 in Herdecke, studierte Physik in Stuttgart und Regensburg. Sie promovierte am Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg und an der Universität Bremen im Fachbereich Produktionstechnik. Stipendien ermöglichten ihr Forschungsaufenthalte an der *University of California*, Santa Barbara/USA sowie am *Imperial College London* und *King's College London*/UK. Ihre Dissertation wurde mehrfach ausgezeichnet, eine Kurzfassung davon mit dem Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft 2010. Seit 2009 arbeitet sie als EU-Referentin am Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik in Freiburg.

Die XLAB Science Festivals 2012 und 2013
wurden vom Universitätsbund Göttingen e.V. gefördert.

Der Druck des Bandes wurde durch die AKB-Stiftung ermöglicht.

Redaktion: Almut Popp

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet
diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Wallstein Verlag, Göttingen 2013
www.wallstein-verlag.de

Vom Verlag gesetzt aus der Stempel Garamond
Umschlaggestaltung: Basta Werbeagentur, Steffi Riemann
Druck: Friedrich Pustet KG, Regensburg
ISBN 978-3-8353-1309-5