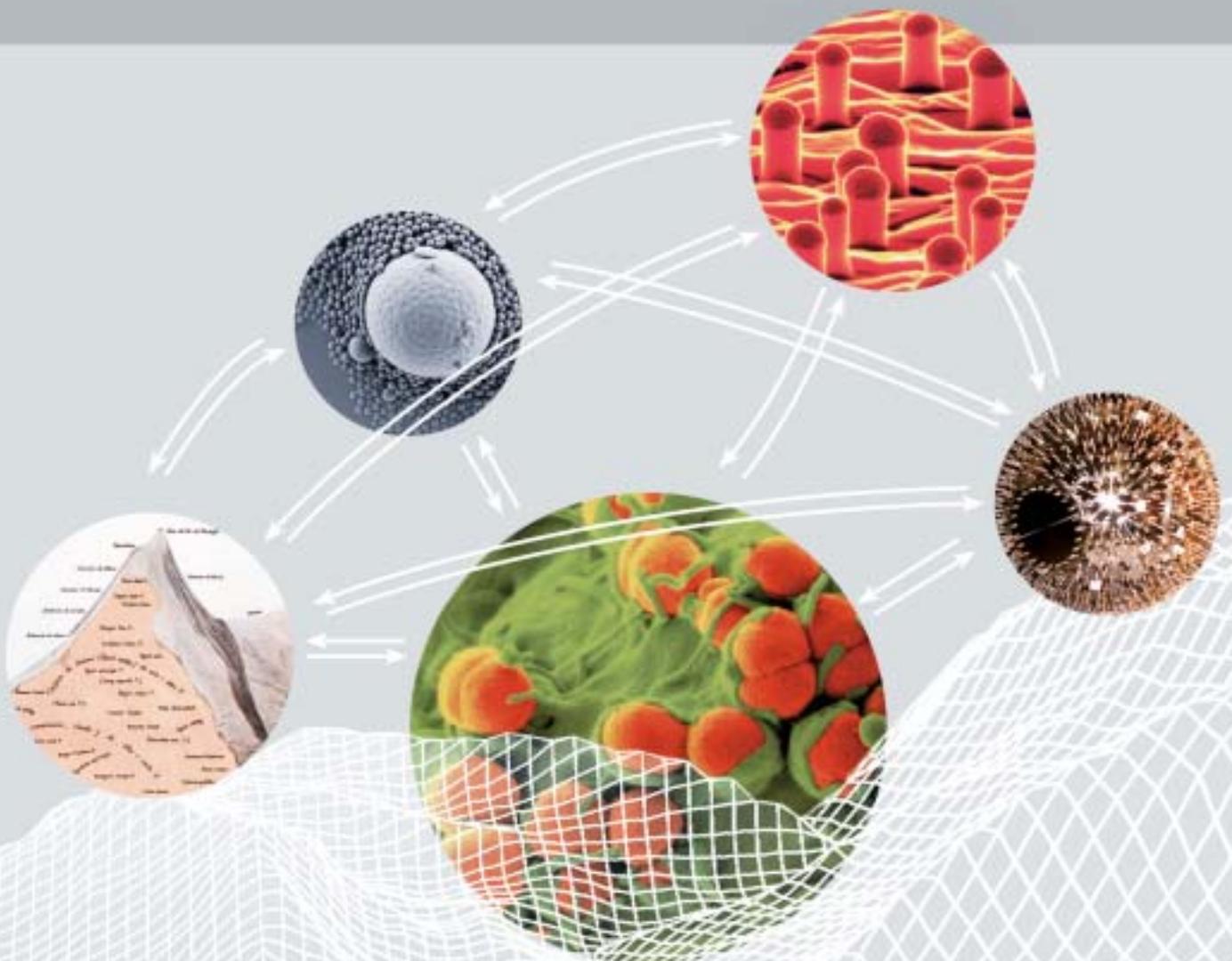


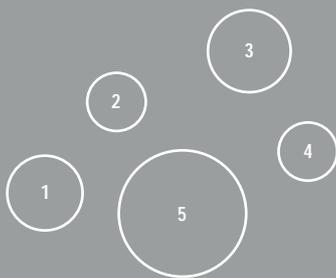


MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

# FORSCHUNGSPERSPEKTIVEN DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



2005



1 Alexander von Humboldts innovative Darstellung in seinem ATLAS GÉOGRAPHIQUE DES RÉGIONS ÉQUINOXIALES DU NOUVEAU CONTINENT (Paris 1814).

2 Der Kunststoff Polystyrol kommt in vielen Bereichen des Lebens zum Einsatz. Durch spezielle Verfahren können Polystyrolteilchen hergestellt werden, deren Oberfläche mit Polyethylenglykol modifiziert ist. Dadurch kann eine biomedizinische Verträglichkeit erreicht werden und die Minibällchen zum Beispiel als Füllmaterial für Säulen zur Analyse biomedizinischer Proben dienen.

3 Wie Zündhölzer ragen winzige Silizium-Nanodrähte aus einem Siliziumsubstrat heraus. Bei 525 Grad Celsius dampfen Physiker Gold auf eine flache Siliziumscheibe und setzen sie anschließend einem Strahl von Siliziumdampf aus. Wo die Goldtropfen auf der Oberfläche aufliegen, beginnen die Nanodrähte in die Höhe zu wachsen.

4 Trifft energiereiches Licht auf Materie, so gibt es an der Grenzfläche des Materials eine Wechselwirkung. Es entstehen Elektronen, die von dem Material aus in alle Himmelsrichtungen wegfliegen. Die negativ geladenen Elektronen fangen die Physiker mithilfe dieser Gold glänzenden Kugel ein und untersuchen sie auf Geschwindigkeit und Richtung.

5 Nur etwa einen Mikrometer groß sind die in dieser mikroskopischen Aufnahme rot eingefärbten Bakterien *Neisseria gonorrhoeae*. Sie lagern sich bei einer Infektion an die hier Grün eingefärbten menschlichen Epithelzellen an, die versuchen, die Angreifer (Rot) an ihrer Oberfläche abzuwehren.

	<b>VORWORT DES PRÄSIDENTEN</b>	<b>4</b>
	<b>Forschungspolitischer Teil</b>	
<b>I</b>	<b>GRUNDLAGENFORSCHUNG – EINE POSITIONSBESTIMMUNG</b>	<b>7</b>
<b>II</b>	<b>DIE MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT IM PROFIL</b>	<b>9</b>
	2.1. Struktur und Mission	
	2.2. Erschließung neuer Horizonte	
<b>III</b>	<b>RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EXZELLENT FÖRDERTE FORSCHUNG</b>	<b>16</b>
	3.1. Qualitätssicherung in der Max-Planck-Gesellschaft	
	3.2. Der notwendige äußere Rahmen	
	<b>Wissenschaftlicher Teil</b>	
<b>I</b>	<b>MIT DEM URKNALL ANFANGEN</b>	<b>23</b>
	Entwicklung des Kosmos	24
	Teilchen- und Astroteilchenphysik	26
	Plasmaforschung – den Stoff des Universums verstehen	28
<b>II</b>	<b>RAUMSCHIFF ERDE</b>	<b>30</b>
	Das System Erde	31
	Grundlagen einer nachhaltigen Energieversorgung – dezentrale Lösungen am Beispiel des Wasserstoffes	34
	Mikrobiologie von Umweltprozessen	37
<b>III</b>	<b>EVOLUTION UND BIOLOGISCHE VIELFALT</b>	<b>37</b>
	Biodiversitätsforschung	38
	Plastizität und Merkmalsvielfalt bei Pflanzen	41
	Evolution	44
	Ursprung des modernen Menschen	46
<b>IV</b>	<b>NEUE MATERIALIEN PRÄGEN DIE ZEITALTER</b>	<b>50</b>
	Biomimetische Materialforschung und Bionik	51
	Moderne Funktionsmaterialien	53
	Photonik und Quantenoptik	56
<b>V</b>	<b>INFORMATION: TECHNIK, LEBEN UND KULTUR</b>	<b>58</b>
	Grundlagen neuer Informationstechnologien	59
	Informationstechnologie in den Geistes-, Human- und Sozialwissenschaften	61
	Wissenschaftsdynamik und Gesellschaftsdynamik	63
<b>VI</b>	<b>THEORIE UND MODELLIERUNG</b>	<b>66</b>
	Neue Fronten der Theorie und Modellierung	67
	Biologische Netzwerke als komplexe Systeme	70
	Systemtechnik und gekoppelte Prozesse	72
	Computational Biology als gemeinsame Initiative der Chinesischen Akademie der Wissenschaften und der Max-Planck-Gesellschaft	74

<b>VII</b>	<b>BIOLOGISCHE STRUKTUREN</b>	<b>76</b>
	Die Strukturbiologie der Zukunft	77
	Strukturen des Lebens	80
<b>VIII</b>	<b>GESUNDHEIT</b>	<b>82</b>
	Chemische Genomik	83
	Die Bedeutung der Grundlagenforschung für Therapien mit Stammzellen	86
	Dialog zwischen Grundlagenwissenschaften und medizinischer Anwendung	89
<b>IX</b>	<b>ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR</b>	<b>91</b>
	Grundlagen der Biologie des Alterns – Neugründung eines Instituts	92
	Internationales Max-Planck-Forschungsnetzwerk Altern	94
<b>X</b>	<b>KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN</b>	<b>96</b>
	Die Entwicklung des Gehirns	97
	Kognitive Neurobiologie	100
	Neurokognition: Kognitive Prozesse und Gehirnfunktionen des Menschen	103
	Psychische Entwicklung des Menschen über die Lebensspanne: Persönlichkeit und Handlungskompetenz	106
<b>XI</b>	<b>SOZIALE ORDNUNG IN EINER GLOBALEN WELT</b>	<b>108</b>
	Soziale und personale Integration in kulturell heterogenen Gesellschaften	109
	Globalisierung: Nationalstaaten in der Weltgesellschaft	111
	Terrorismus, Krieg, politische Gewalt	113
<b>XII</b>	<b>MÄRKTE UND INSTITUTIONEN</b>	<b>115</b>
	Die sichtbaren und unsichtbaren Voraussetzungen der unsichtbaren Hand	116
	Institutionen für den <i>homo sapiens</i>	119
	Eigentums- und Wettbewerbsordnungen als strukturelle Voraussetzung wirtschaftlicher Entwicklung	122
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>126</b>
	<b>Standorte der Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft</b>	<b>128</b>

## VORWORT DES PRÄSIDENTEN ZU DEN FORSCHUNGSPERSPEKTIVEN DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Der Blick in die Zukunft übt in der Wissenschaft ebenso wie in der Dichtung eine ungeheure Anziehungskraft aus. „Wie geht es weiter?“, wollen wir wissen – sei es in Fernsehserien, in Fortsetzungsromanen, in der wissenschaftlich-technischen Entwicklung oder im eigenen Leben. Die Wissenschaft ist ein Teil unserer Kultur, die stets nach vorne strebt und auf Neues gerichtet ist. Und das Neue ist nicht nur das noch nie da Gewesene, sondern auch das noch nie Gedachte. Ein Zusammenhang, den ein Forscher

neu erkennt, eine Beobachtung, die ihm zum ersten Mal ins Auge fällt – all das ist dem Entdeckergeist geschuldet, der in der menschlichen Natur selbst zu stecken scheint. Schon aus der Frühgeschichte der Menschheit gibt es Hinweise darauf, dass unsere Urahnen die Gesetze der Natur zu ergründen suchten – die berühmte Sternscheibe von Nebra in Sachsen-Anhalt ist einer davon. Zusätzliche Anreize für den Forschergeist sind die Herausforderungen des täglichen Lebens und die Versuche, es zu erleichtern. Die Ergebnisse reichen von der Erfindung des Papiers bis zu der des Internet, von den ersten Bronzegüssen bis zu modernen Verbundwerkstoffen, von den Tinkturen mittelalterlicher Mönche bis zu neu entwickelten hochwirksamen Medikamenten gegen Krebs und AIDS.

Während Entdeckungen und Erfindungen vergangener Zeiten häufig eher zufällig und vereinzelt zustande kamen, wird Forschung heute von Staat und Industrie zielgerichtet unterstützt. Eine besondere Rolle spielt dabei die Grundlagenforschung. Denn ohne grundlegende Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten in der belebten und unbelebten Natur fehlt jeder anwendungsorientierten Forschung die Basis. So wären weder Laser noch GPS entwickelt worden, hätte nicht Albert Einstein vor 100 Jahren die Gesetze von Energie, Materie, Licht und Gravitation neu formuliert. Übrigens hat der große Theoretiker Einstein selbst im Laufe seines Lebens vierzehn Patente angemeldet, an zahlreichen anderen Erfindungen war er direkt beteiligt.

Die beiden tragenden Säulen der Grundlagenforschung in Deutschland sind die Universitäten und die außeruniversitären Forschungsorganisationen wie die Max-Planck-Ge-



Der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, Peter Gruss

sellschaft. Zusammen mit anderen Einrichtungen, die sich der anwendungsorientierten bzw. der strategisch-programmatisch ausgerichteten Forschung widmen, bewährt sich das Forschungssystem gerade in Zeiten, in denen der internationale Konkurrenzdruck immer höher wird. Um exzellente Ergebnisse zu erzielen, braucht Wissenschaft Freiräume – bei der Berufung der besten Wissenschaftler ebenso wie bei der Wahl der Forschungsthemen, die aus wissenschaftlicher Sicht besonders herausfordernd und zukunftsweisend erscheinen. Den Kurs, den die Max-Planck-Gesellschaft dabei einschlägt, lotet sie immer wieder neu aus. Zur Organisation unserer Gesellschaft und ihrem Vorgehen in der Perspektivenplanung findet sich eine Übersicht im ersten Kapitel dieser Broschüre.

Welche Themen stehen nun in den kommenden Jahren ganz oben auf der Agenda? Wer dazu Näheres wissen möchte, sollte sich in die folgenden Kapitel vertiefen: Das Forschungsspektrum an den Max-Planck-Instituten reicht von der Entwicklung des Kosmos über die biologische Vielfalt bis hin zur Integration verschiedener Kulturen. Damit legt die Max-Planck-Gesellschaft das Fundament, um den Herausforderungen der Gesellschaft zu begegnen. Hier nur einige Beispiele: Der viel diskutierte demografische Wandel wirft auch grundlegende Fragen nach den Ursachen des Alterns auf. Worin bestehen die genetischen Voraussetzungen des Alterns? Wie können Krankheiten im Alter früher erkannt und wirksamer geheilt werden? Wie lassen sich körperliche und geistige Fähigkeiten im Alter erhalten? Welche gesellschaftlichen Veränderungen sind nötig, um die Produktivität älterer Menschen besser zu nutzen? Antworten auf diese Fragen sind ein Schlüssel, um die Veränderungen in der Alterspyramide bewältigen zu können.

Die Rechts- und Sozialwissenschaften werden sich in den kommenden Jahren mit der Frage befassen, wie der internationale Terrorismus eingedämmt werden kann. Denn die Ziele und Konfliktlinien verschiedener Terrororganisationen beschränken sich nicht mehr auf einzelne Länder, sie werden zur globalen Bedrohung. Die Terroristen sind anders organisiert als im 20. Jahrhundert, sie haben andere Geldquellen und bedienen sich neuer Formen von Gewalt und Erpressung. Die Institute der Max-Planck-Gesellschaft bieten eine interdisziplinäre Plattform, um die Probleme der neuen Sicherheitsdebatte grundlegend zu erörtern.

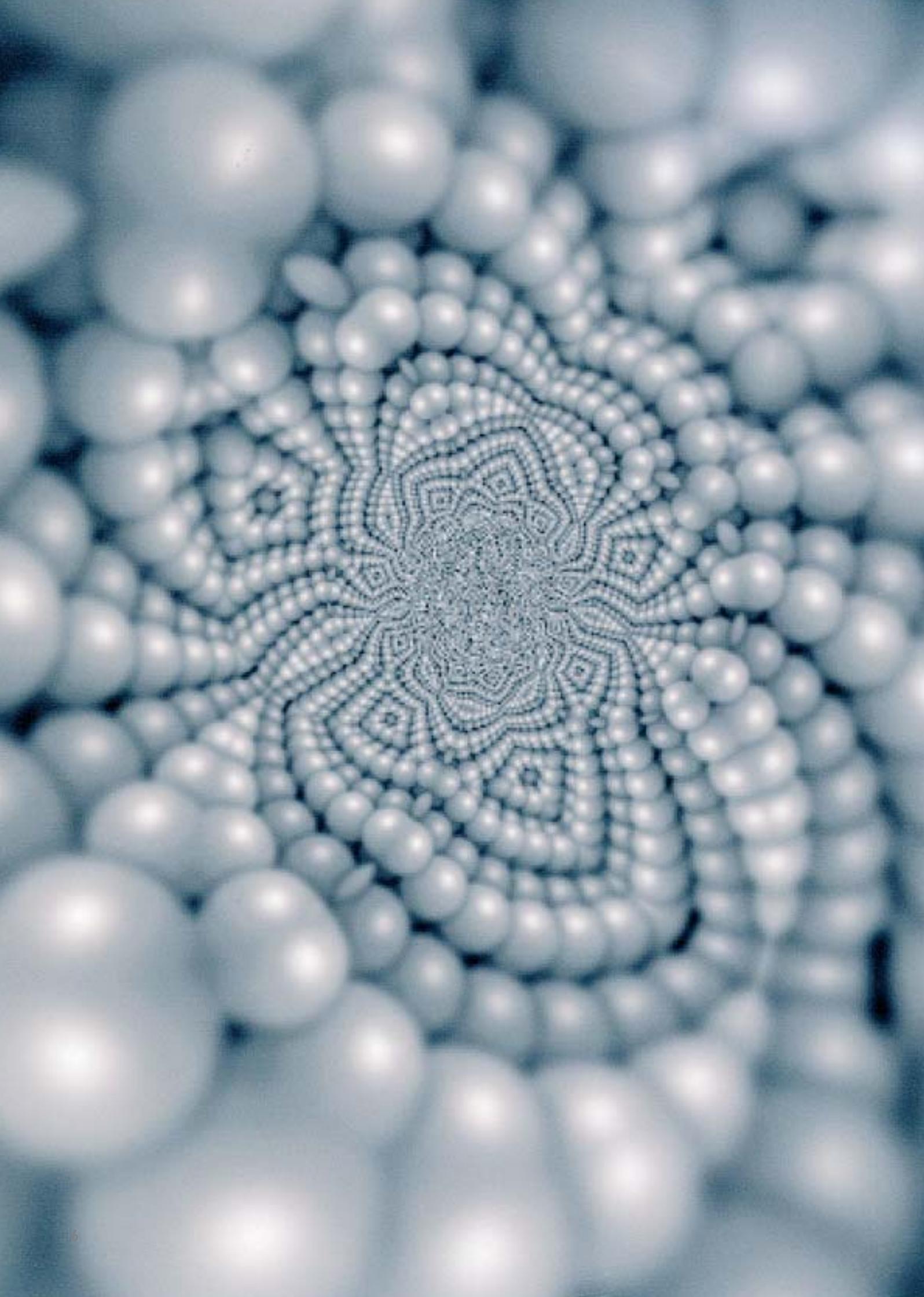
Von globalem Interesse ist auch die Frage, wie in Zukunft die Energieversorgung sichergestellt werden kann, ohne die Atmosphäre weiter aufzuheizen. In vielen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft wird grundlegend an Komponenten für ein auf Wasserstoff beruhendes Energie-Kreislauf-

system gearbeitet – angefangen bei verbesserten katalytischen Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff über Arbeiten zur Nachahmung der Fotosynthese bis hin zu neuen Methoden für die Speicherung von Wasserstoff.

Max-Planck-Institute sind keine Elfenbeintürme. Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung unterscheiden sich oft nur in zeitlicher Hinsicht: Grundlegende Erkenntnisse werden in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt praktisch nutzbar, dafür sind die daraus resultierenden Produkte wirklich innovativ. Ein vielversprechendes, aber derzeit von der Anwendung noch weit entferntes Gebiet ist zum Beispiel die Quantenphysik. Die Wissenschaftler versuchen, auf die Bewegung und die Zustände mikroskopischer Materie gezielt Einfluss zu nehmen. Dafür ist präzise kontrolliertes Licht ein einzigartiges Instrument. Diese Versuche zeigen vollkommen neue Möglichkeiten zur Verarbeitung von Informationen, woraus sich langfristig ein neuer Typ von Computer, ein Quantencomputer, entwickeln lassen könnte. Quantencomputer könnten eine Chance bieten, komplexe Vorgänge zu verstehen, die mit klassischen Computern nicht simuliert werden können.

Um die Ergebnisse der Grundlagenforschung zur Marktreife zu bringen, werden allerdings zusätzliche Mittel und Kapazitäten sowie spezielles Know-how benötigt. Der Markt für Risikokapital in Deutschland ist jedoch sehr begrenzt. Wir haben daher Überlegungen angestellt, wie der Technologietransfer in Deutschland verbessert werden kann. Unsere Idee ist es, einen Innovationsfonds für die Deutsche Forschung aufzulegen; er soll die Weiterentwicklung wissenschaftlicher Ergebnisse für die Anwendung nicht nur finanzieren, sondern auch inhaltlich unterstützen. Ob die Politik diese Idee aufgreift, ist noch offen. Der deutschen Wirtschaft könnte ein solches Modell große Chancen eröffnen.

All unsere Anstrengungen können allerdings nur von Erfolg gekrönt sein, wenn die Ausgaben für Forschung und Bildung als Investitionen in die Zukunft angesehen werden. Exzellente Wissenschaft braucht verlässliche Rahmenbedingungen. Die deutsche Forschung ist nicht schlecht aufgestellt, das zeigt sich auch in der Zahl der am häufigsten zitierten Publikationen: Deutschland befindet sich hier auf dem dritten Platz, gleich nach den USA und Großbritannien. Mit Unterstützung der Politik und der Wirtschaft können wir diese hervorragende Position ausbauen. Ein kleiner Beitrag dazu wäre, nicht die Probleme zu sehen, welche die Zukunft möglicherweise bringt, sondern die Perspektiven, welche sie bietet – besonders die Forschungsperspektiven, die dazu beitragen können, künftige Herausforderungen zu bewältigen.



# I. GRUNDLAGENFORSCHUNG – EINE POSITIONSBESTIMMUNG

Wissenschaft und Forschung bestimmen die Strukturen unserer Gesellschaft in einem noch nie da gewesenen Maß. Die Aus- und Folgewirkungen erlebt jeder täglich und unmittelbar. Innovative Produkte, moderne Dienstleistungen und hohe Mobilität bestimmen unsere Arbeitswelt, beeinflussen unsere Freizeitgewohnheiten und prägen unser Weltbild. Die moderne Grundlagenforschung hat daran wesentlichen Anteil: Sie bildet die Basis für ökonomischen Wohlstand und gesellschaftlichen Fortschritt.

Die Generierung von Grundlagenwissen in den Max-Planck-Instituten zielt nicht unmittelbar auf anwendbare Produkte oder Verfahren. Sie steht vielmehr ganz am Anfang einer Wertschöpfungs- oder Informationskette, indem sie das Wissen und die Prinzipien für mögliche technische Innovationen oder gesellschaftlichen Wandel bereitstellt. Von der wissenschaftlichen Entdeckung bis zur Produkt-einführung oder zum Wirksamwerden sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse können mehrere Jahrzehnte vergehen. So beginnen erst jetzt die warnenden Hinweise zur demografischen Entwicklung unserer Bevölkerung – stagnierende Geburtenraten und zunehmende Lebenserwartung – Einfluss auf die Sozialversorgungssysteme und die Gesetzgebung zu nehmen.

Oft regen naturwissenschaftliche Durchbrüche, für die ursprünglich kein kommerzieller Markt erkennbar war, erst viel später die Entstehung ganz spezifischer Bedarfsstrukturen an. Der Laser illustriert hier sehr deutlich, welche Zeitspanne zwischen den theoretischen Grundlagenerkenntnissen Albert Einsteins und der technischen Innovation liegen kann. Wissenschaftliche Entdeckungen lassen sich weder planen noch vorhersehen, geschweige denn

innerhalb von vorgegebenen Fristen erarbeiten. In aller Regel müssen sie mühsam in einem langfristigen Prozess der Natur abgerungen werden. Es gibt dennoch erprobte Verfahren, mit denen dieser Entdeckungsprozess effektiv und erfolgreich im Wettbewerb mit anderen Wissenschaftskulturen gestaltet werden kann. Das wohl Wichtigste dabei ist die Sicherung wissenschaftlicher Exzellenz, die in der Max-Planck-Gesellschaft durch sehr aufwändige Berufungs- und Evaluationsverfahren gewährleistet wird.

Oft wird Forschung in Grundlagenforschung und angewandte Forschung differenziert. Doch diese Unterscheidung ist nicht immer hilfreich: Grundlagenforschung und angewandte Forschung sind nicht voneinander zu trennen, sondern sie sind aufeinander angewiesen. Das Zusammenwirken lässt sich besser als eine gesellschaftlich wichtige



Präsident Gruss präsentiert die Max-Planck-Gesellschaft im Zuge der Vorbereitungen zum 7. Rahmenprogramm der EU in Brüssel im November 2004.

Arbeitsteilung auf verschiedenen Zeitskalen verstehen. Die Transferprozesse von der Grundlagenforschung in die Anwendung können jedoch schneller ablaufen, wenn Themen der Grundlagenforschung gleichzeitig von höchster Relevanz für die Gesellschaft sind oder einen unmittelbaren ökonomischen Nutzen versprechen. Als Beispiele sind hier etwa die Entwicklung eines Impfstoffes gegen SARS und optimierte Algorithmen für die schnelle Bildverarbeitung oder Datenkompression zu nennen. Ein intensives Engagement im Bereich der Grundlagenforschung hat erheblichen Einfluss auf die mittel- bis langfristige wirtschaftliche Zukunft und den Wohlstand eines Landes, insbesondere wenn Kapital und kreative Köpfe die wichtigsten Erfolgsfaktoren darstellen.

Dank einer bislang leistungsstarken Grundlagenforschung in Deutschland spielen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der internationalen Community eine wichtige Rolle. Sie nehmen aktiv an der weltumspannenden Verbreitung von neuen Forschungsergebnissen teil. Der dadurch entstehende Rückkopplungs- und Austauschprozess treibt die wissenschaftliche Produktivität in den eigenen Instituten voran, erzeugt geistiges Eigentum und beschleunigt den Wissenstransfer auf dem Weg zum nutzbaren Produkt. Länder ohne eigene kritische Masse in der Grundlagenforschung sind lediglich Anwender von Hochtechnologie, die anderswo entstanden ist und teuer eingekauft werden muss.

Für die Ausbildung und Weiterbildung von talentierten jungen Menschen ist eine gute Forschungsbasis unverzichtbar. Grundlagenforschung trägt auch hier wesentlich dazu bei, dass wissenschaftlicher Nachwuchs an den Universitäten und Forschungsinstituten eine an den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen orientierte Ausbildung erhält.

Eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche Grundlagenforschung ist – neben Neugier, Kreativität und Wagnisbereitschaft – die Unabhängigkeit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in ihrer täglichen Arbeit. Die entscheidenden Entdeckungen mit fundamentalem Einfluss auf die Menschheit hatten ihren Ursprung oftmals in den Studierzimmern und Laborräumen der Grundlagenforschung und waren frei von direktem Ergebnisdruck, wie die Beispiele der auf den nächsten Seiten porträtierten Nobelpreisträger belegen.

## II. DIE MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT IM PROFIL

### 2.1. STRUKTUR UND MISSION

#### Rolle in der deutschen Forschungslandschaft

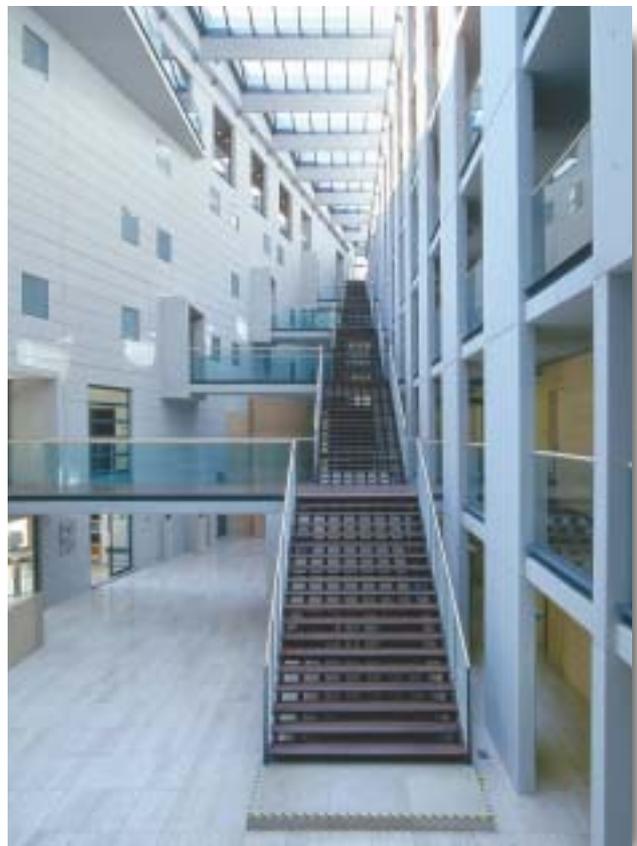
Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) leistet unabhängige und gemeinnützige Spitzenforschung überwiegend in eigenen Instituten und Einrichtungen. Die dort tätigen Forscherinnen und Forscher haben den Anspruch, mit wissenschaftlichen Höchstleistungen den Erkenntnishorizont der Menschheit stetig zu erweitern. Die Institute und Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft sind frei in der Wahl ihrer Forschungsaufgaben und Themenschwerpunkte: Sie forschen in den Bereichen der Natur-, Bio-, Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaften, sind nicht an Auftraggeber gebunden und stehen ganz im Dienste der Allgemeinheit.

Im System der institutionellen Forschungsförderung in Deutschland nimmt die Max-Planck-Gesellschaft eine besondere Rolle ein, kooperiert jedoch eng mit anderen Forschungsorganisationen und den Universitäten. Die Mittel- bis Langfristigkeit in besonders wichtigen und zukunfts-trächtigen Forschungsgebieten kennzeichnet ihre Themen. Der Anspruch ist die international sichtbare Spitzenleistung im Bereich der Grundlagenforschung, wobei sie ihr Potenzial auf ausgewählte innovative Forschungsschwerpunkte fokussiert.

#### Institute und Sektionen

Derzeit gibt es 78 Max-Planck-Institute und Einrichtungen mit unterschiedlicher Größe, Struktur und Aufgabenstellung, die sich mit ihren Standorten auf alle Bundesländer und das nähere Ausland (Niederlande, Italien) verteilen. Die Institute werden den drei Sektionen der Max-Planck-

Gesellschaft zugeordnet (Chemisch-Physikalisch-Technische Sektion, Biologisch-Medizinische Sektion und Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftliche Sektion).



Die Himmelstreppe im Max-Planck-Haus am Hofgarten in München.



#### NOBELPREIS FÜR CHEMIE, 1995

Paul Crutzen J. (\*1933), MPI für Chemie

Paul Crutzen und seine Mitpreisträger Mario J. Molina und F. Sherwood Rowland haben mit bahnbrechenden Leistungen das Verständnis der chemischen Prozesse der Bildung und des Abbaus von Ozon erheblich erweitert. Sie haben nachgewiesen, wie sensibel die Ozonschicht auf die von Menschen verursachten Luftverunreinigungen, insbesondere FCKW-Emissionen, reagiert. Es hat sich gezeigt, dass die dünne Ozonschicht eine Achillesferse des Planeten Erde darstellt, die durch scheinbar geringfügige Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre ernsthaft geschädigt werden kann. Mit der Entschlüsselung der konzentrationsbestimmenden Mechanismen des atmosphärischen Ozons und den eindringlichen Warnungen vor den Folgen einer ungehemmten Emission ozonzerstörender Gase, haben Paul Crutzen und seine Mitpreisträger auf ein globales Umweltproblem aufmerksam gemacht.

#### Nationale und internationale Sichtbarkeit

Die Institute der Max-Planck-Gesellschaft betreiben keine Auftragsforschung und unterliegen keinen verpflichtenden programmatischen Vorgaben. Gleichwohl beteiligen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft an den Förderprogrammen der Länder, des Bundes und der Europäischen Union. Durch das Einbringen von Grundlagenwissen und der Sicherung einer mittel- bis langfristigen exzellenten Wissensbasis steuert die Max-Planck-Gesellschaft wesentlich zu Qualität und Erfolg der Projekte bei und erbringt so ihren Anteil an der Wertschöpfungskette.

Bei all diesen Aufgaben ist die internationale Sichtbarkeit der Max-Planck-Gesellschaft in zahlreichen Wissenschaftsbereichen offensichtlich und fand unter anderem durch die Vergabe von bisher zwölf Nobelpreisen (seit 1954) ihre Anerkennung. Dieses Ansehen wird auf der Basis eines begrenzten Etats erwirtschaftet, der etwa dem zweier größerer deutscher Universitäten oder rund zwei Prozent der Gesamtausgaben für Forschung und Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland entspricht.

#### Komplementarität der Themen

Zwei Merkmale sind für neu aufgegriffene Themen bezeichnend: Sie sind oft von disziplinübergreifender Natur und finden zunächst aus Kostengründen oder wegen aufwändiger, spezieller Einrichtungen nur schwer Eingang in die Hochschulforschung. Besonderes Augenmerk finden dabei die Themen und Ideen, die sich neu entwickeln, für die es noch keine Fakultäten gibt und die damit gerade auch außerhalb der ausgetretenen Pfade etablierter Disziplinen liegen. Mit diesem Leistungsspektrum steht die Max-Planck-Gesellschaft nicht in Konkurrenz zu den Universitäten, sondern ergänzt diese auf wichtigen Forschungsfeldern und in der Lehre. In den vielfältigen Formen der Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Max-Planck-Instituten ist Komplementarität der Schlüsselbegriff. Zahlreiche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft sind an den jeweiligen Standorten gleichzeitig als Hochschullehrer tätig und bei der Gründung von Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen aktiv.

Einige Institute der Max-Planck-Gesellschaft erfüllen außerdem Dienstleistungsfunktionen für die Hochschulforschung: Sie stellen aufwändige Einrichtungen und Geräte – von Teleskopen und anderen Großgeräten bis hin zu Spezialbibliotheken und Dokumentationen – einem breiten Wissenschaftlerkreis zur Verfügung, mit dem sie zum Teil gemeinsame Forschungsprojekte bearbeiten.



Gefährliche Eindringlinge: Nur etwa einen Mikrometer groß sind die in dieser Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme blau gefärbten Bakterien.

MPI für Infektionsbiologie/Wolker Brinkmann

**Verflechtungen im internationalen Forschungsnetzwerk**  
Mit der internationalen Ausrichtung sichert sich die Max-Planck-Gesellschaft ihre herausragende Rolle. Max-Planck-Institute sind beliebte Forschungspartner von Spitzenforschungseinrichtungen und -universitäten in Westeuropa, in den USA und in Japan. Die Auswahl der besten Kooperationspartner bleibt dabei vollständig den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern überlassen. Dieses sehr erfolgreiche Prinzip der selbstorganisierten Internationalität wird von einer entsprechend ausgerichteten Berufungspolitik begleitet, denn die voranschreitende internationale Ausrichtung von Forschung drängt die Max-Planck-Gesellschaft in einen Wettbewerb um die besten auf dem Weltmarkt verfügbaren Forscherinnen und Forscher. So hat sich der Anteil der ausländischen Wissenschaftlichen Mitglieder in der Max-Planck-Gesellschaft auf fast 28 Prozent erhöht, in den neuen Bundesländern beträgt er derzeit sogar 44 Prozent. Die Max-Planck-Gesellschaft ist momentan jünger und internationaler als vor zehn Jahren.

Um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können, unternimmt die Max-Planck-Gesellschaft erhebliche Anstrengungen bei der wissenschaftlichen Nachwuchsförderung. Etwa 9600 Nachwuchs- und Gastwissenschaftler arbeiten an den Instituten und Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft, davon sind etwa 49 Prozent aus dem Ausland. Die meisten von ihnen kommen aus den Ländern der EU und Osteuropas, aus der Russischen Föderation, China, Indien und den USA. Angesichts der wachsenden Dynamik in den Forschungssystemen wirtschaftlich aufstrebender Länder in Mittel- und Osteuropa, Asien und Südamerika hat die Max-Planck-Gesellschaft ihre Internationalisierungsstrategie den aktuellen Entwicklungen angepasst. Traditionell enge Beziehungen bestehen mit Israel, vor allem mit den Partnern am Weizmann-Institut.

Kennzeichnend für die Internationalität der Max-Planck-Gesellschaft ist auch das praktizierte Evaluierungssystem.

Viele ausländische Experten werden als so genannte Fachbeiräte in die regelmäßigen wissenschaftlichen Begutachtungen von Max-Planck-Instituten einbezogen. Der Anteil der aus dem Ausland stammenden Fachbeiräte beträgt mehr als 70 Prozent. Umgekehrt sind die Wissenschaftlichen Mitglieder der Max-Planck-Gesellschaft als international anerkannte Experten in die Beurteilung anderer Wissenschaftsorganisationen und Universitäten im In- und Ausland integriert und hoch geschätzt.

#### Nachwuchsförderung

Weit über die satzungsgemäße Verpflichtung hinaus wird die Nachwuchsförderung in der Max-Planck-Gesellschaft als große Verantwortung und Zukunftsaufgabe angesehen. Verschiedene Förderinstrumente tragen zur Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses, der Bildung einer wissenschaftlichen Elite sowie der Internationalisierung der deutschen Forschung bei. So haben herausragend qualifizierte Hochschulabsolventen mit ihren Promotionsvorhaben seit jeher einen wichtigen Anteil an der Forschungsarbeit der Institute. Im Anschluss an die Promotion können junge Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler im Rahmen von Postdoc-Stipendien zu ihrer weiteren Qualifizierung eigene Forschungsarbeiten in den Max-Planck-Instituten durchführen oder an anderen Forschungsvorhaben mitarbeiten.

Schon seit 1969 fördert die Max-Planck-Gesellschaft besonders begabte junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in zeitlich befristeten Selbständigen Nachwuchsgruppen. Auf der Basis eines begrenzten, aber gesicherten Etats erhalten die im internationalen Wettbewerb ausgewählten Jungforscherinnen und -forscher ihre Chance zur ersten eigenverantwortlichen wissenschaftlichen Tätigkeit in größerem Rahmen. Die Leitung einer Selbständigen Nachwuchsgruppe erweist sich bis heute als ein wichtiger, besonders flexibler Modellfall auf dem Weg zu einer erfolgreichen Karriere.



#### NOBELPREIS FÜR MEDIZIN, 1995

Christiane Nüsslein-Volhard (\*1942), MPI für Entwicklungsbiologie

Gemeinsam mit Edward B. Lewis und Eric F. Wieschaus erhielt Christiane Nüsslein-Volhard den Nobelpreis für ihre Entdeckungen zur genetischen Kontrolle der frühen Embryonalentwicklung. Mithilfe ihrer Gradiententheorie konnte sie bei der Taufliege *Drosophila* klären, wie aus der einfach strukturierten Eizelle verschiedenartige Zellen und die komplexe Gestalt eines Organismus entstehen, indem bereits im Ei Substanzen platziert werden, die diffundieren und definierte Konzentrationsgefälle bilden. Die entsprechenden biochemischen Prozesse laufen in allen höheren Organismen ähnlich ab. Diese Erkenntnisse sind daher auch für die Humanmedizin von praktischem Nutzen. So lassen sich damit einige Gendefekte aufspüren, die beim Menschen zu schwerwiegenden Fehlbildungen und Funktionsstörungen führen können. Darüber hinaus legten die Arbeiten die konzeptionelle Basis für das Verständnis der Regeneration von Geweben und damit für die regenerative Medizin.

Im Zuge der Internationalisierungsbestrebungen wurden inzwischen auch mit ausländischen Partnerorganisationen gemeinsame Nachwuchsgruppen eingerichtet: Ein deutscher Nachwuchswissenschaftler leitet dabei eine Nachwuchsgruppe an einem ausländischen Forschungsinstitut, während ein ausländischer Wissenschaftler Nachwuchsgruppenleiter an einem Max-Planck-Institut wird. Diese Form der Nachwuchsförderung wird mit Einrichtungen des Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Frankreich, mit dem Weizmann-Institut in Israel und der Polnischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt.

Das bewährte Instrument der Selbständigen Nachwuchsgruppen wurde im Jahr 2004 weiter entwickelt: Von nun an sind themen- und institutsoffene Ausschreibungen möglich. Aktuell plant die Max-Planck-Gesellschaft, Mittel für bis zu 25 zusätzliche Nachwuchsgruppen bereitzustellen. Ein Teil davon ist für das neue Nachwuchsgruppenmodell vorgesehen, die ersten Stellenausschreibungen sind bereits erfolgt.

Eine besondere Bedeutung für die Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses erlangte in den vergangenen fünf Jahren die strukturierte Graduiertenförderung durch die International Max Planck Research Schools (IMPRS). Wichtige Erfolgsfaktoren einer IMPRS sind ein zwischen den Trägern abgestimmtes Ausbildungsprogramm, die intensive Betreuung der Doktoranden und besonders gute Forschungsmöglichkeiten. Die IMPRS tragen wesentlich dazu bei, die universitäre Graduierten- und Doktorandenausbildung im internationalen Wettbewerb um die talentiertesten Männer und Frauen zu positionieren sowie den Forschungs- und Ausbildungsstandort Deutschland weltweit stärker hervorzuheben.

Nach vier separaten Ausschreibungsrunden werden von der Max-Planck-Gesellschaft mittlerweile 37 IMPRS gefördert. Die Bewilligung erfolgte jeweils nach gemeinsamer Evaluation mit der Hochschulrektorenkonferenz (HRK). Insgesamt sind über 40 Max-Planck-Institute und deren Partneruniversitäten an diesen Graduiertenschulen beteiligt. Eine fünfte Ausschreibungsrunde wird derzeit vorbereitet.

#### Dialog mit der Öffentlichkeit

Die mit öffentlichen Mitteln geförderte Max-Planck-Gesellschaft legt großen Wert auf den Dialog mit der Öffentlichkeit. So sieht die Max-Planck-Gesellschaft es als ihre Aufgabe an, die von der Wissenschaft ausgehende Faszination den Bürgerinnen und Bürgern verständlich mitzuteilen und auf die Möglichkeiten des neu entstandenen Wissens hinzuweisen. Der Aufklärungsbedarf ist in beiderlei Richtungen offensichtlich. Gerade die Transformation und die Vermittlung von Spezialwissen leisten einen wichtigen Beitrag, um der Öffentlichkeit den Stellenwert der Grundlagenforschung zu verdeutlichen.

Dazu tragen aktuelle Meldungen aus den Instituten sowie entsprechende Filmbeiträge auf den offiziellen Internetseiten der Max-Planck-Gesellschaft für Journalisten und interessierte Bürger bei, aber auch das Magazin MAX-PLANCKFORSCHUNG (das auch als MAXPLANCKRESEARCH in englischer Übersetzung erscheint) mit vielen Berichten über wissenschaftliche Höhepunkte aus den Instituten und die dahinterstehenden Menschen sowie über die Belange der Gesellschaft.

Die Veranstaltungsreihe MAX-PLANCK-FORUM thematisiert mit Vorträgen und Diskussionen aktuelle Aspekte aus der Wissenschaft. Mit der MAX-Broschürenreihe (BIOMAX, GEOMAX, TECHMAX) und vielen ergänzenden, über ein eigenes Internet-Portal leicht zugänglichen



#### NOBELPREIS FÜR MEDIZIN, 1991

Erwin Neher (\*1944), MPI für biophysikalische Chemie

Bert Sakmann (\*1942), MPI für medizinische Forschung

Erwin Neher und Bert Sakmann erhielten die Auszeichnung für ihre gemeinsame Entdeckung der Funktion einzelner zellulärer Ionenkanäle. Die Entwicklung der Patch-Clamp-Methode durch Neher und Sakmann revolutionierte die Zellbiologie, indem sie die Messung der grundlegenden physikalischen Vorgänge und erstmals die Beobachtung der Funktion eines Moleküls ermöglichte. Damit änderte sich in der Medizin die Sicht auf viele Krankheiten, da bei diesen häufig die Fehlfunktion von Ionenkanälen eine besondere Rolle spielt. Diese Erkenntnisse ermöglichten die nachfolgende Entwicklung maßgeschneiderter Medikamente für Krankheiten wie Mukoviszidose, Epilepsie und verschiedenste Herzgefäßerkrankungen.



#### NOBELPREIS FÜR CHEMIE, 1988

Robert Huber (\*1937), MPI für Biochemie  
 Hartmut Michel (\*1948), MPI für Biophysik  
 Johann Deisenhofer (\*1943), MPI für Biochemie von 1971-1988

Johann Deisenhofer, Robert Huber und Hartmut Michel erhielten den Nobelpreis für ihre gemeinsam durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der dreidimensionalen Struktur eines bakteriellen Photosynthese-Reaktionszentrums, dem Protein, in dem der zentrale Schritt der Lichtenergieumwandlung (Photosynthese) stattfindet. Hartmut Michel gelang es, diesen Proteinkomplex in reiner kristalliner Form herzustellen. Dies ermöglichte es darauf den Preisträgern, die molekulare Struktur

des Reaktionszentrums durch Anwendung von Methoden der Röntgenstrukturanalyse zu bestimmen. Huber, Michel und Deisenhofer legten damit die Basis zu modernen Konzepten für die Synthese neuer Materialien, die eine effiziente Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie ermöglichen.

Lehr- und Lernmaterialien leistet die Max-Planck-Gesellschaft einen Beitrag zum naturwissenschaftlichen Unterricht in der gymnasialen Oberstufe. Partnerschaften mit den führenden Medien aus den Bereichen Print, Internet und Rundfunk unterstützen die Präsenz der Max-Planck-Gesellschaft in der breiten Öffentlichkeit.

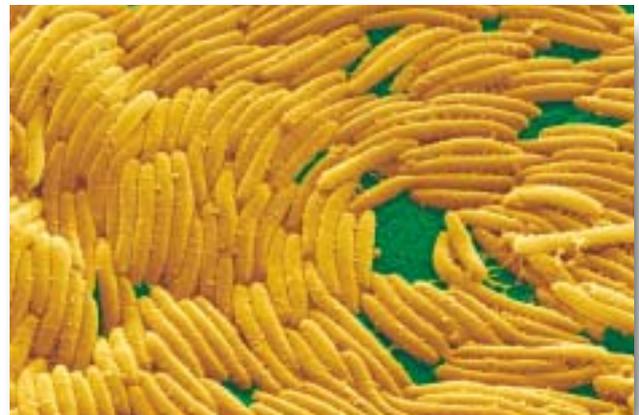
Das Einstein-Jahr 2005 markiert einen besonderen Schwerpunkt der Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Gesellschaft: Kernstück des Themenjahres ist die Ausstellung „Albert Einstein: Ingenieur des Universums“, die im Berliner Kronprinzenpalais gezeigt wird. Gleichzeitig präsentiert die Max-Planck-Gesellschaft die Wanderausstellung „Science Tunnel“ in Japan. Diese erstmals auf der Expo 2000 gezeigte Multimedia-Präsentation führt die Besucher auf eine virtuelle Reise durch die Größenordnungen unserer Welt – von den kleinsten Teilchen bis zum Universum. Mit Tagen der offenen Tür treten die Max-Planck-Institute in den Dialog mit vielen Bürgern in ihrem direkten Umfeld, um sie über Forschung zu informieren, Interesse zu wecken und Hemmschwellen abzubauen.

#### Technologie- und Wissenstransfer: Schnittstelle zur Wirtschaft

Auch wenn die Forschung in der Max-Planck-Gesellschaft auf Grundlagenwissen abzielt, gelangen den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern häufig patentierfähige Erfindungen, die aktiv angewendet werden. Die Zunahme des Wissenstransfers aus Max-Planck-Instituten in gewerbliche Unternehmen führte schon 1970 zur Gründung einer unabhängigen Tochterfirma, die sich ausschließlich mit der Verwertung und dem Transfer neuer Ideen befasst. Unter

dem Namen „Garching Innovation“ (GI) identifiziert heute ein interdisziplinäres Team aus Naturwissenschaftlern, Betriebswirten und Juristen solche Entdeckungen und Erfindungen, die zu einer möglichen industriellen Nutzung führen können.

Die Max-Planck-Gesellschaft ermuntert ihre Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch zu Unternehmensausgründungen – soweit die Rahmenbedingungen der öffentlich finanzierten Forschung diese Art des Technologietransfers erlauben. Basis eines effizienten Wissenstransfers sind jedoch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die Max-Planck-Gesellschaft bietet jungen, qualifizierten Diplomanden und Doktoranden erstklassige Ausbildungsplätze in ihren Instituten und lehrt neben dem fachlichen Wissen auch das Arbeiten in interdisziplinären Gruppen gemäß



*M. xanthus* und andere nah verwandte Arten von Myxobakterien produzieren eine große Auswahl antibiotischer Substanzen, die auf einen möglichen Einsatz gegen Pathogene und Tumoren getestet werden.

MPI für Entwicklungsbiologie/Gregory Welcher et al.

den Regeln modernen Forschungsmanagements. Ein Teil dieser jungen Menschen strebt nach erfolgreichem Abschluss des Studiums oder der Promotion eine Karriere in der Wissenschaft an und trägt so zum weiteren Erkenntnisfortschritt bei. Ein anderer Teil jedoch wird von der Wirtschaft und der Industrie rekrutiert und bringt dort die bei der Max-Planck-Gesellschaft gewonnenen Erkenntnisse, Fertigkeiten und Denkweisen in den wirtschaftlichen Produktionsprozess ein.

## 2. 2. ERSCHLIESSUNG NEUER HORIZONTE

### Perspektivische Vorausschau

Erfolge in der Grundlagenforschung sind nicht planbar. Vor dem Hintergrund des Anspruchs wissenschaftlicher Exzellenz und begrenzter finanzieller Ressourcen bedarf es effizienter Prozesse, um neue Forschungsthemen zu identifizieren und Schwerpunkte zu setzen. Die Max-Planck-Gesellschaft entwickelte dazu ein Repertoire an Werkzeugen und Verfahren, mit denen neue Forschungsthemen aufgespürt und in den Instituten etabliert werden.

Die kritische Auseinandersetzung mit dem eigenen Fachgebiet und der notwendige Einblick in benachbarte Disziplinen sind wesentliche Elemente, um neue Forschungshorizonte zu erkennen und ihre Bedeutung einzuschätzen. Die Mitglieder der wissenschaftlichen Sektionen der Max-Planck-Gesellschaft tragen daher mit ihrer Expertise wesentlich dazu bei, innovative Forschungsthemen frühzeitig zu identifizieren und die Entwicklung der Institute vorausschauend zu planen. Unterstützt werden sie dabei durch den Rat und die Anregung von internen und externen Kolleginnen und Kollegen. Die Beschlüsse und Empfehlungen aus den Sektionen haben beratenden Charakter und bereiten die Entscheidungen des Senats vor.

Der Senat und sein ständiger Ausschuss für Forschungsplanung sind für die Perspektivenplanung verantwortlich. Durch seine besondere Zusammensetzung – Experten aus

Wissenschaft, Wirtschaft und Politik – werden im Senat auch gesellschaftliche und politische Fragestellungen in den Planungsprozess eingebunden.

Darüber hinaus werden in gemeinsamen Beratungen des Präsidiums und der Vorsitzenden des Wissenschaftlichen Rates sowie der Sektionen in regelmäßigen Abständen Entwicklungsplanungen der Institute diskutiert. Dabei geht es sowohl um Fragen der Forschungsperspektiven, der Personalstruktur und der Einbettung in das wissenschaftliche Umfeld als auch um die gerätetechnische Ausstattung und die Unterbringung von Abteilungen und Einrichtungen. Die Beratungsergebnisse fließen unmittelbar in die Arbeit des Senats ein. Gleichzeitig bilden sie auch die Grundlage für die Entscheidungen des Präsidenten, der die Grundzüge der Wissenschaftspolitik der Max-Planck-Gesellschaft entwirft.

Bei den Berufungsverfahren für Wissenschaftliche Mitglieder hat der Präsident eine besondere Verantwortung: Die Ergebnisse dieser Beratungen beinhalten Maßnahmen zur Weiterführung und Umstrukturierung bestehender Institute oder Vorschläge zur Errichtung neuer Forschungseinrichtungen. Um die Flexibilität und Innovationsfähigkeit der Gesellschaft zu erhalten, ist nach einer Emeritierung die entsprechende Institutsabteilung zunächst zu schließen. Dies ermöglicht ein höchstes Maß an gestalterischem Freiraum bei der Wahl eines Nachfolgers oder der Aufnahme eines neuen Forschungsfeldes. Darüber hinaus ist auch der konsequente Rückzug aus einst bedeutenden Forschungsschwerpunkten möglich – beispielsweise durch die ersatzlose Auflösung von Abteilungen oder die Schließung eines Instituts. Mit diesem Vorgehen schafft sich die Max-Planck-Gesellschaft einen Teil ihrer finanziellen Spielräume für das Aufgreifen innovativer Themen oder sogar für die Errichtung neuer Institute wie etwa des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin (Münster), des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme (Saarbrücken und Kaiserslautern) und des geplanten Max-Planck-Instituts zur Erforschung der Biologie des Alterns.



### NOBELPREIS FÜR PHYSIK, 1986

Ernst Ruska (1906-1988), Fritz-Haber-Institut der MPG

Ernst Ruska erhielt die Auszeichnung für sein fundamentales Werk in der Elektronenoptik und für die Konstruktion des ersten Elektronenmikroskops (Transmissionsmikroskop). Er trug damit wirksam zur Entwicklung von kommerziellen, im Serienbau hergestellten Elektronenmikroskopen bei, die in vielen verschiedenen Wissenschaftsbereichen rasch zur Anwendung kamen. Elektronenmikroskope dienen heute in zahlreichen Gebieten wie der Materialforschung, der Biologie und der Medizin zur Aufklärung kleinster Strukturen.



#### NOBELPREIS FÜR PHYSIK, 1985

Klaus von Klitzing (\*1943), MPI für Festkörperforschung

Klaus von Klitzing erhielt den Nobelpreis für die Entdeckung des so genannten quantisierten Hall-Effektes. Unter dem Einfluss starker Magnetfelder und tiefer Temperaturen von wenigen Kelvin bleibt der elektrische Widerstand, d.h. die Spannung (Hallspannung) geteilt durch den Strom, der durch den Leiter fließt, nicht konstant, sondern ist immer ein ganzzahliger Bruchteil der Klitzing-Konstante  $R_K = h/e^2$  (Planck'sche Konstante geteilt durch das Quadrat der Elementarladung). Aufgrund der extrem hohen reproduzierbaren Genauigkeit wurde die Klitzing-Konstante durch internationale Verträge als Standard für den elektrischen Widerstand festgelegt. Mit zunehmender Verbesserung der Eigenschaften künstlich hergestellter Halbleiterkristalle konnten danach weitere, theoretisch nicht vorhergesagte Effekte entdeckt werden, u.a. der „Fraktionale Quanten-Hall-Effekt“, der 1998 zu einer weiteren Nobelpremierung gelangte.

Insbesondere vor weitreichenden Entscheidungen – wie der Gründung neuer Institute oder strukturellen Veränderungen – hat der Präsident zusätzlich die Möglichkeit, die Empfehlungen hochkarätig und international besetzter Präsidentenkommissionen in seine Überlegungen einzubeziehen. Beispiele aus der jüngsten Vergangenheit sind die Präsidentenkommissionen zur Altersforschung/Gerontologie oder zur sozialwissenschaftlichen Forschung in der Max-Planck-Gesellschaft.

#### Neue Formen der Zusammenarbeit

Eine weitere Quelle neuer Ideen und Visionen stellt der erstmals mit den MPG FORSCHUNGSPERSPEKTIVEN 2000+ angestoßene Prozess einer zusammenführenden Perspektivenplanung dar. Die darin von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern beschriebenen Zukunftsprojekte führten in der Folgezeit zu vielen verwirklichten Forschungsvorhaben, internen Programmen zur Nachwuchssicherung und Maßnahmen zur Stärkung sowie Intensivierung der Zusammenarbeit mit den Universitäten.

Innerhalb der zurückliegenden fünf Jahre wurden aus den aussichtsreichsten Projektvorschlägen zahlreiche institutsübergreifende Forschungsinitiativen realisiert. Dieses Programm trägt dem „trans-interdisziplinären“ Charakter der Grundlagenforschung Rechnung und fördert die instituts- oder sogar sektionenübergreifende Zusammenarbeit bei neuen Forschungsthemen. Mit der Förderung innovativer Einzelprojekte aus den Instituten konnte die strategische Positionierung der Max-Planck-Gesellschaft auf bestimmten Forschungsgebieten wie Astronomie, Genomforschung oder Geisteswissenschaften unterstützt werden.

Ein erfolgreiches Beispiel für neue Formen der Zusammenarbeit ist das 2001 gegründete European Neuroscience Institute (ENI) in Göttingen. Das Ziel der seit Oktober 2004 von der Max-Planck-Gesellschaft und dem Bereich Humanmedizin der Universität Göttingen gemeinsam getragenen Einrichtung ist die europaweite Förderung und Vernetzung der Ausbildung von Studierenden und Wissenschaftlern in den Neurowissenschaften. Darüber hinaus hat die Max-Planck-Gesellschaft mit den Max-Planck-Forschungsgruppen an den Universitäten eine weitere Form der Zusammenarbeit entwickelt: Die Forschungsgruppen werden auf der Grundlage eines gemeinsamen Konzeptes und Berufungsverfahrens von Max-Planck-Gesellschaft und Universität gefördert und greifen neue wissenschaftliche Fragestellungen auf. Die Max-Planck-Gesellschaft ist angesichts der umfangreichen, klinisch orientierten Grundlagenforschung in vielen ihrer Institute auf intensive und vielfältige Zusammenarbeit mit Kliniken angewiesen. Um diese Zusammenarbeit zu optimieren und die notwendigen Rahmenbedingungen zu verbessern, wurden so genannte zeitlich befristete Tandemprojekte zwischen Max-Planck-Instituten und Universitätskliniken eingerichtet. Für die intensive Kooperation zwischen Grundlagenforschern der Max-Planck-Gesellschaft und wissenschaftlich ausgewiesenen Klinikern im Bereich der patientenorientierten Forschung stellte die Max-Planck-Gesellschaft finanzielle Mittel für Nachwuchsgruppen und Post-doc-Stipendien bereit. Weitere Tandemprojekte befinden sich in der Vorbereitungsphase. Mit den bereits beschriebenen IMPRS trägt die Max-Planck-Gesellschaft nicht unerheblich zu der vom Wissenschaftsrat geforderten flächendeckenden Einführung von Graduiertenschulen in Deutschland bei.

### III. RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EXZELLENT FORSCHUNG

Wesentliche Faktoren für exzellente Grundlagenforschung sind eine strenge interne Qualitätssicherung und verlässliche sowie international wettbewerbsfähige Rahmenbedingungen.

#### 3.1. QUALITÄTSSICHERUNG IN DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Um Spitzenleistungen in der Grundlagenforschung zu sichern, sind strenge Qualitätsmaßstäbe und ein modernes Qualitätsmanagement nötig. Die Kriterien zur Bewertung von wissenschaftlichen Leistungen orientieren sich an höchsten internationalen Standards und werden stetig an die sich wandelnden Rahmenbedingungen angepasst. Ihre Autonomie im Sinne einer weitgehenden Selbstgestaltungsmöglichkeit nutzt die Max-Planck-Gesellschaft auch im Qualitätsmanagement, indem sie mit einem differenzierten und international vernetzten Bewertungssystem wissenschaftliche Exzellenz garantiert.

Die Max-Planck-Gesellschaft hat ein ausgefeiltes Evaluationsverfahren entwickelt, das der Exzellenz und Qualität ihrer Forschung entspricht, diese kritisch begleitet und langfristig sicherstellt. Nach der sehr aufwändigen und kompetitiven Auswahl der zentralen Forscherpersönlichkeiten nach dem Harnack-Prinzip werden alle Max-Planck-Institute regelmäßig durch den so genannten Fachbeirat evaluiert. Aufgabe der Fachbeiräte ist es, in zeitlichen Intervallen (im Regelfall alle zwei Jahre) den Stellenwert der Institute kritisch zu reflektieren und damit zu gewährleisten, dass aktuelle Forschungsgebiete auf international höchstem Niveau bearbeitet werden.

Eine institutsübergreifende Bewertung mehrerer thematisch ähnlicher Institute, die in so genannten Forschungsfeldern zusammengefasst sind, erfolgt alle sechs Jahre im Rahmen der Erweiterten Evaluation. Auf diese Weise werden gemeinsame Probleme erkannt und eine synoptische Empfehlung zur weiteren Entwicklung des Forschungsfeldes ermöglicht.



#### NOBELPREIS FÜR MEDIZIN, 1984

Georges Köhler (1946-1995); MPI für Immunbiologie

Georges Köhler erhielt gemeinsam mit Niels K. Jerne und César Milstein den Nobelpreis für die Entdeckung des Prinzips der Produktion von monoklonalen Antikörpern. In der Absicht, etwas über die Regulation der Antikörpersynthese zu lernen, stellte Köhler Zellhybride aus Antikörper bildenden Zellen und Tumorzellen einer immunisierten Maus her, um so zwei Eigenschaften zu vereinigen: Wachstum der Gewebekultur und Produktion spezifischer Antikörper. Dieses Experiment gelang und bestätigte nicht nur die Theorie der Genetik des Immunsystems, sondern bildete zugleich – unerwartet – die Grundlage für zahlreiche molekularbiologische und medizinische Anwendungen. Monoklonale Antikörper sind heute aus den biomedizinischen Laboratorien nicht mehr wegzudenken.



### NOBELPREIS FÜR MEDIZIN, 1973

Konrad Lorenz (1903-1989); MPI für Verhaltensphysiologie

Gemeinsam mit Karl von Frisch und Nikolaas Tinbergen erhielt Konrad Lorenz den Nobelpreis für Entdeckungen zur Organisation und Auslösung individueller und sozialer Verhaltensmuster. Genaueste und unvoreingenommene Beobachtungen der Tiere bildeten die Grundlage seiner Arbeit. Lorenz war dabei einer der ersten Verhaltensforscher (Ethologen), die auf dieser Basis die Begriffe „angeborenes Verhalten“, „Schlüsselreiz“, und „Instinkthandlungen“ einführten. Von Lorenz stammt ferner auch der Begriff der „Prägung“, ein Vorgang, der stattfindet, wenn in einer bestimmten, meist zeitlich sehr eng begrenzten Lebensphase („sensiblen Phase“) bestimmte Reize geboten werden, die dann – meist nicht mehr rückgängig zu machend (irreversibel) – das spätere Verhalten bestimmen. Konrad Lorenz hat mit seinen Arbeiten die moderne Verhaltensforschung begründet.

Die Basis aller Evaluationsverfahren der Max-Planck-Gesellschaft ist das in der Wissenschaft allgemein anerkannte Peer-Review-System der Leistungsbewertung. Dieses Verfahren basiert auf der Überzeugung, dass nur gleichrangige Vertreter (Peers) einer Disziplin die Arbeiten ihrer Kolleginnen und Kollegen kompetent evaluieren können. Denn sie verfügen über den erforderlichen Sachverstand, um sowohl bisherige Forschungsleistungen als auch zukünftige Perspektiven von Forschungsthemen so zu bewerten, dass ihr Urteil und ihre Empfehlung von den Evaluierten akzeptiert und geschätzt wird.

#### ► PEER REVIEW

Das System des Peer Review beruht auf der freiwilligen Zusammenarbeit von Experten aus aller Welt. Während die Max-Planck-Gesellschaft diesen externen Rat erhält, sind ihre Wissenschaftlichen Mitglieder als international anerkannte Experten ebenfalls in die Evaluation anderer Wissenschaftsorganisationen und Universitäten im In- und Ausland integriert. In diesem Prozess des Gebens und Nehmens leistet die Max-Planck-Gesellschaft einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Vernetzung der deutschen Forschung sowie zu ihrer eigenen internationalen Reputation. Das Peer-Review-System steht für ein wissenschaftsbasiertes Beratungsnetzwerk mit geringem Kostenaufwand und gleichzeitig maximalem Ertrag.

#### ► DAS HARNACK-PRINZIP ZUR SICHERUNG WISSENSCHAFTLICHER EXZELLENZ

Zentraler Bestandteil der Berufungspolitik der Max-Planck-Gesellschaft ist das bereits von der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (KWG) tradierte Harnack-Prinzip. Adolf von Harnack, Gründungspräsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, stellte einen herausragenden Forscher in den Mittelpunkt jeder Instituts-

gründung oder Fortführung eines Institutes. Um diese Forscherpersönlichkeit herum war das passende Institut oder die Abteilung zu errichten, um auf diese Weise adäquate Entwicklungsmöglichkeiten für wissenschaftliche Höchstleistungen zu bieten.

Um Spitzenforschung zu gewährleisten, stellt die Max-Planck-Gesellschaft an die Forschungskonzeption eines Institutes oder einer Abteilung sowie an die damit betraute Leitungsperson höchste Qualitätsansprüche. Die Max-Planck-Gesellschaft beruft nur solche Forscher als Wissenschaftliche Mitglieder an ihre Institute, die im internationalen Vergleich zu den führenden Vertretern ihrer jeweiligen Disziplin zählen. Sie verzichtet im Einzelfall auch auf die Einrichtung oder Fortführung von Instituten oder Abteilungen, wenn keine qualifizierten Forscherinnen und Forscher gewonnen werden können.

### 3.2. DER NOTWENDIGE ÄUSSERE RAHMEN

#### Finanzielle Planungssicherheit

Grundlagenforschung erfordert einen langen Atem von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, aber auch bei den Zuwendungsgebern. Wissenschaftliche Forschungsprojekte erstrecken sich meist über mehrere Jahre. Sie sind – je nach Erfolg oder Misserfolg – mit der Option auf eine Verlängerung angelegt. Manche große Forschungsthemen wie die Fusionsforschung oder die Genomforschung beschäftigen die Wissenschaftler ein ganzes Arbeitsleben lang. Die Aufnahme neuer Forschungsrichtungen durch den Aufbau einer neuen Institutsabteilung oder die Gründung eines neuen Max-Planck-Instituts benötigen eine mehrjährige

Anlaufphase und sind bis zur Erreichung der vollen Produktivität auf den kontinuierlichen Zustrom von zusätzlichen Finanzmitteln angewiesen. Für die Planungssicherheit in der Grundlagenforschung sind daher ein mittelfristig gesicherter Finanzierungsrahmen und verlässliche Mittelzuweisungen unabdingbar.

Mit dem Pakt für Forschung und Innovation wollen Bund und Länder den Forschungsorganisationen Planungssicherheit geben und die Zuwendungen für Wissenschaft und Forschung kontinuierlich steigern. Sie stellen der Max-Planck-Gesellschaft bis zum Jahr 2010 jährliche Haushaltszuwächse von mindestens drei Prozent in Aussicht. Im Gegenzug leitet die Max-Planck-Gesellschaft – unter Wahrung aller Qualitätsstandards und Beachtung ihrer satzungsgemäßen Aufgaben – eine Reihe von Maßnahmen ein, die eine effiziente und qualitative Forschung sowie eine Wissenschaft auf dem bestehenden hohen Niveau sichern und steigern. Dazu gehören die Mitwirkung an den Exzellenzclustern, eine verstärkte Vernetzung, die Förderung unkonventioneller Ansätze, eine intensivere Kooperation besonders mit den Universitäten, die Intensivierung der Nachwuchsförderung, die Beförderung der Chancengleichheit und die Verbesserung des Technologietransfers.

#### Wahrung der wissenschaftlichen Autonomie

Wissenschaftliche Autonomie und Eigenverantwortung garantieren, dass die Max-Planck-Gesellschaft auch künftig ihre Aufgaben nachhaltig und erfolgreich erfüllt. Die internationale Spitzenstellung verdankt sie unter anderem dem ihr bislang gewährten Höchstmaß an Selbstgestaltungsfähigkeit, die sich in der unabhängigen Berufungspolitik, der Freiheit in der Wahl der Forschungsthemen und -methoden und seit kurzem in der Haushaltsbudgetierung manifestiert. Entscheidend für die Wahrung dieser Autonomie ist die Bereitstellung der notwendigen finanziellen Ausstattung im Rahmen der institutionellen Förderung und der Freiräume in der wissenschaftspolitischen Rahmensetzung

durch den Bund und die Länder, die der Max-Planck-Gesellschaft im Vertrauen auf deren Leistungsfähigkeit gewährt werden. Ein Abbau der institutionellen Förderung zu Gunsten einer kurzfristigen, an politischen Zielen orientierten Programmforschung birgt die Gefahr, dass Freiräume eingeschränkt werden und dass in die erfolgreiche Arbeitsteilung zwischen den verschiedenen Forschungsinstitutionen eingegriffen wird.

Angewandte Forschung und Grundlagenforschung sind nicht getrennt voneinander zu sehen: Es gibt keine angewandte Forschung ohne Grundlagenforschung. Eine verstärkte Förderung kurzfristiger Interessen auf Kosten der mittel- und langfristigen Profil- und Wissensbildung hieße, den für eine Industrienation überlebensnotwendigen und zu bewahrenden Wissensvorsprung aufzugeben. Für die Forschung in Pionierbereichen müssen alle Handlungsoptionen gegenüber dem Unerwarteten offen gehalten werden. Insbesondere dann, wenn Qualitäts- und Exzellenzkriterien erfüllt werden. Eine institutionelle Komponente in der Forschungsförderung ist daher für die Grundlagenforschung unverzichtbar.

#### Ideale Arbeitsbedingungen für Spitzenwissenschaftler

Um konkurrenzfähig zu bleiben, muss die Max-Planck-Gesellschaft die besten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gewinnen und auch halten. Dies setzt ein leistungsgerechtes und international wettbewerbsfähiges Tarifrecht für die Forscherinnen und Forscher voraus, das den in ausländischen Forschungseinrichtungen gebotenen Vergütungen, Leistungen und Nettogehältern gleicht. Um die besten Köpfe für die Grundlagenforschung in Deutschland zu gewinnen, muss die Max-Planck-Gesellschaft mit konkurrenzfähigen Angeboten auftreten können. Diese Anpassung des Tarifrechts an die internationalen Wettbewerbsbedingungen muss mit einer entsprechenden Modifikation des Arbeitsrechts einhergehen.



#### NOBELPREIS FÜR CHEMIE, 1967

Manfred Eigen (\*1927), MPI für biophysikalische Chemie

Manfred Eigen erhielt gemeinsam mit Ronald George Wreyford Norrish und George Porter den Nobelpreis für die Messung und Aufklärung des Mechanismus von extrem schnellen chemischen und biochemischen Reaktionen. Diese bis dahin für unmessbar gehaltenen Reaktionen werden durch Zerstörung des Gleichgewichts mittels sehr kurzer Energieimpulse ausgelöst. Damit war es erstmals möglich, Reaktionen bis zu einer Nanosekunde verfolgen zu können und damit Enzymreaktionen in ihren Elementarschritten aufzuklären. Die Arbeit von Manfred Eigen ist heute Grundlage für die moderne molekulare Diagnostik, mit deren Verfahren es möglich ist, einzelne biologische Moleküle zu detektieren, beispielsweise die für Alzheimer oder die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit verantwortlichen Proteine. Die Charakterisierung auf der Einzelmolekülebene eröffnet bisher ungeahnte Potenziale für die molekulare Diagnostik, für das Transplantatdesign und die Metastasenprävention bei Krebserkrankungen.



#### NOBELPREIS FÜR MEDIZIN, 1964

Feodor Lynen (1911-1979), MPI für Zellchemie

Für seine Arbeiten über den Mechanismus und die Regulierung des Cholesterin- und Fettsäurestoffwechsels erhielt Feodor Lynen zusammen mit Konrad Emil Bloch (1912-2000) den Nobelpreis für Physiologie/Medizin des Jahres 1964. Feodor Lynen identifizierte zunächst einen wichtigen Baustein des Cholesterins. Darauf aufbauend schloss sich die mit dem Nobelpreis gewürdigte Aufklärung der 25-stufigen Cholesterin-Biosynthese in der Leberzelle an. Als wichtigste Entdeckung für einen therapeutischen Nutzen dieser Grundlagenerkenntnis erwies sich, dass sich die komplexe Reaktionskette über einen einzigen Schritt abschalten lässt. Damit lässt sich die Cholesterin-Produktion und -Konzentration in der Leber absenken. Dieses Wissen wird heutzutage für die moderne Prävention von Herzinfarkten (durch sog. CSE-Hemmer) angewandt.

#### Leistungsfähiges universitäres Umfeld

Die Max-Planck-Gesellschaft ist zur erfolgreichen Umsetzung ihres Auftrags auf die Zusammenarbeit mit leistungsstarken Hochschulpartnern angewiesen. In einem gegenseitigen Prozess des Gebens und Nehmens partizipiert die Max-Planck-Gesellschaft am wissenschaftlichen Nachwuchs. Dies schließt auch die Berufung von Hochschulprofessoren zu Wissenschaftlichen Mitgliedern mit ein. Im Gegenzug eröffnen die Universitäten dem in der Max-Planck-Gesellschaft ausgebildeten wissenschaftlichen Nachwuchs vielfältige Karrierewege.

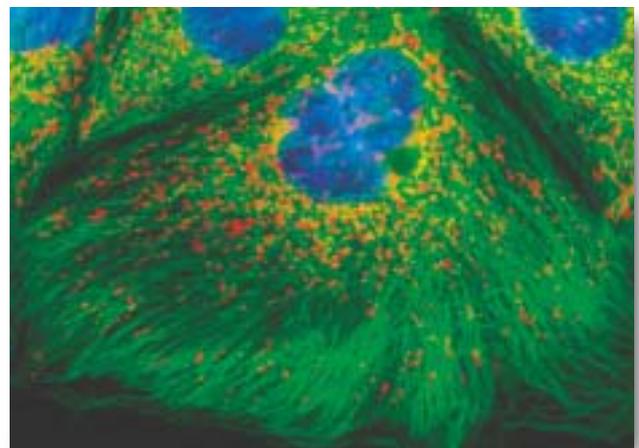
Seit Jahrzehnten richtet die Max-Planck-Gesellschaft ihr Handeln vor allem bei Neugründungen an bestehenden universitären Strukturen aus. In aller Regel erfolgen Neugründungen im unmittelbaren Umfeld leistungsstarker Universitäten. Gerade durch die enge Verbundenheit zwischen Max-Planck-Einrichtungen und einer Universität wird lokal ein Standort erzeugt, der Forschung und Lehre in einem fokussierten Bereich mit höchstem Anspruch leisten kann.

Durch institutionelle Verklammerungen wie Kooperationsverträge, Doppelberufungen, die Einbindung wissenschaftlicher Mitarbeiter in die universitäre Lehre oder gemeinsame Ausbildungsprogramme für Studierende und Doktoranden werden institutionell Mehrwerte geschaffen, die die wissenschaftliche Leistungsfähigkeit beider Organisationen erhöhen. Dazu tragen auch die neuen Kooperationsformen wie IMPRS, Tandemprojekte der klinischen Forschung und Max-Planck-Forschungsgruppen an Universitäten bei.

Das Wohlergehen leistungsstarker Universitäten steht damit im existenziellen Interesse der Max-Planck-Gesellschaft. Umgekehrt kann die Max-Planck-Gesellschaft durch die genannten Instrumente zur geplanten Etablierung von Spitzenuniversitäten und Exzellenzclustern und der damit verknüpften Profilbildung der deutschen Forschung im internationalen Wettbewerb maßgeblich beitragen.

#### Gesellschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen

Die Innovation der Gesellschaft beginnt in den Köpfen der Menschen, da sie mit der Einstellung gegenüber Veränderungen zu tun hat. Die kritische Auseinandersetzung mit dem Neuen gehört zur demokratischen Kultur, darf aber nicht zum Hemmschuh für Kreativität und Erneuerung werden.



Der Transporter SGLT 1 sorgt dafür, dass der Traubenzucker aus der Nahrung in die Zellen aufgenommen werden kann.

MPI für molekulare Physiologie/Helmut Kipp



#### NOBELPREIS FÜR CHEMIE, 1963

Karl Ziegler (1898-1973), MPI für Kohlenforschung

Karl Ziegler teilte sich 1963 den Nobelpreis mit Giulio Natta für die Entdeckungen auf dem Gebiet der Chemie und Technologie von Kunststoffen und anderer kommerziell wichtiger synthetischer Verbindungen. Karl Ziegler beschäftigte sich insbesondere mit der Untersuchung stabiler Radikale und metallorganischer Verbindungen. Er entwickelte Katalysatoren, die bei der Herstellung von Kunststoffen deren Einheitlichkeit, Härte, Stärke und Wärmebeständigkeit verbesserten. So gelang ihm beispielsweise die Entwicklung eines Niederdruckverfahrens zur Herstellung von Polyethylen. Auf diese Weise können polymere Werkstoffe und neue Arten von synthetischem Kautschuk einfacher hergestellt werden.

Mit dem Gesetz zum Import menschlicher embryonaler Stammzellen und dem Embryonenschutzgesetz wurde zunächst eine Grundlage geschaffen, auf der Vor- und Nachteile der embryonalen somatischen Stammzellensysteme untersucht werden können. Künftig ist jedoch zu überdenken, ob die in den Gesetzen verfügbaren Einschränkungen im Vergleich mit den internationalen wissenschaftlichen Standards und der unaufhaltsamen Entwicklung der Stammzellforschung einer Überarbeitung bedürfen.

Ein Thema mit vergleichbarem Stellenwert ist die Grüne Gentechnik, die international als eine wichtige Zukunftstechnologie angesehen wird. Das 2004 novellierte Gen-

technikgesetz bestimmt den notwendigen Rahmen für die gewerbliche Nutzung genetisch veränderter Pflanzen. Gleichzeitig bedeuten die darin formulierten Anforderungen und Haftungsregelungen jedoch erhebliche Einschränkungen für die Grundlagenforschung und Entwicklung auf diesem Gebiet, die sich in signifikanter Weise von der großflächigen industriellen Anwendung unterscheiden. Um die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Forschungsstandort für diese mögliche Zukunftstechnologie nicht zu gefährden, sollte die mit diesem Gesetz bewirkte Überregulierung nochmals geprüft werden.

Vor einiger Zeit wurde der Tierschutz als Staatsziel im Grundgesetz verankert. Für die Forschung kann dies jedoch gravierende Einschränkungen bedeuten, insbesondere wenn dadurch für die biomedizinische Grundlagenforschung unerlässliche Tierversuche verhindert werden. Die vom Bundesrat gefällte Entscheidung gegen die Einführung eines Verbandsklagerechts für Tierschutzverbände ist in dieser Hinsicht zu begrüßen.

Das Thema Energieforschung wird seit mehreren Jahren vor dem Hintergrund der Verknappung der konventionellen Energiereserven, der Kohlendioxid-Problematik, des beschlossenen Ausstiegs aus der Atomenergie, der Abhängigkeit von Importen fossiler Energieträger und der Krisenherde im Nahen und Fernen Osten diskutiert. Wünschenswert wäre an dieser Stelle ein ideologiefreier Wettbewerb zwischen unterschiedlichen neuen Technologien, einschließlich der Kernfusionsforschung – ohne politische Einflussnahme.



Polymere sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken – sie beeinflussen in fast jedem Werkstoff die Eigenschaften des Materials.

Wissenschaft und Forschung nutzen den Stand des Wissens und bauen darauf auf. In einer digitalisierten und vernetzten Informationsgesellschaft muss der Zugang zur weltweiten Information für jedermann zu jeder Zeit und an jedem Ort für die Zwecke der Bildung und Wissenschaft sichergestellt sein. Diese Informations- und Kommunikationsprozesse dürfen daher nicht durch restriktive Regelungen im Urheberrecht eingeschränkt werden.

Mit den Open-Access-Aktivitäten beschreitet die Max-Planck-Gesellschaft neue Wege der Wissensverbreitung. Das Internet stellt derzeit hinsichtlich seiner Verfügbarkeit, Kosten und Entwicklungsmöglichkeiten das ideale Medium dar. Die Unterzeichner der „Berliner Erklärung“ unterstützen die Vision eines nachhaltigen, interaktiven und transparenten Internets zur Wissensverbreitung und Bewahrung des Kulturerbes und werden den Übergang zum elektronischen Publizieren aktiv fördern.

#### ► DIE BERLINER ERKLÄRUNG

wurde in Übereinstimmung mit der Budapester Initiative (Budapest Open Access Initiative), der ECHO-Charta (ECHO: European Cultural Heritage Online) und der Bethesda-Erklärung (Bethesda Statement on Open Access Publishing) entworfen, um das Internet als Instrument für eine globale Basis wissenschaftlicher Kenntnisse und geistiger Reflexion zu fördern und um die Maßnahmen zu benennen, die von Politikern, Forschungsorganisationen, Förderinstitutionen, Bibliotheken, Archiven und Museen bedacht werden sollten. Die Unterzeichner der Berliner Erklärung unterstützen den Übergang zum „Prinzip des offenen Zugangs“.

Die skizzierten Beispiele zeigen, dass auch die gesetzlichen und politischen Rahmenbedingungen für die Forschung einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Anpassung bedürfen. Maßgebende Richtschnur für notwendige Veränderungen sollten ausschließlich das Wissen und der Wissenserwerb über Chancen und Risiken sein, damit die wissenschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung unserer Gesellschaft keinen Rückschlag erleidet.



#### NOBELPREIS FÜR PHYSIK, 1954

Walter Bothe (1891-1957), MPI für Kernphysik

Walter Bothe erhielt die Nobelauszeichnung für seine Koinzidenzmethode und seine mit deren Hilfe gemachten Entdeckungen. Die von ihm entwickelte Methode basiert auf der Hintereinanderschaltung zweier oder mehrerer so genannter Geiger-Müller-Zählrohre. Bei diesem Messverfahren für atomare Teilchen spricht ein Zählrohr nur dann an, wenn zwei oder mehrere Detektoren in der gleichen einstellbaren Zeitspanne einen Impuls abgeben. Die Verfeinerung des Verfahrens ermöglichte ihm die Bestimmung von Flugbahnen, Geschwindigkeiten und Reichweiten der atomaren Teilchen. Die Koinzidenzmethode entwickelte sich bis heute zu einem wichtigen Verfahren der Analyse kosmischer Strahlung und aller Arten von Kern- und Elementarteilchenprozessen.



## MIT DEM URKNALL ANFANGEN

Gemäß dem derzeit vorherrschenden naturwissenschaftlichen Weltbild ist alles irdische Leben auf den Urknall zurückzuführen. Der Blick ins All und zu den Sternen basiert zwar auf wissenschaftlichem Erkenntnisinteresse, gleichzeitig stellt sich die Frage nach der menschlichen Herkunft und Entwicklung. Nicht zuletzt deshalb ist die Astronomie eine der ältesten Naturwissenschaften. Momentan befinden sich die Astronomie/Astrophysik in einer Hochphase. Von der Öffentlichkeit fast unbemerkt hat sich die Vorstellung vom All verändert: Der Weltraum ist nicht ganz so leer wie angenommen, sondern voll mit Dunkler Materie und Dunkler Energie. Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich noch, und riesige Schwarze Löcher bestimmen das Geschehen in den Zentren der Galaxien. Diese Beobachtungen haben auch Auswirkungen auf die Physik der Elementarteilchen.

Durch die gegenseitige Befruchtung der beiden Felder entsteht eine neue Qualität in der Wissenschaft. Ähnliches gilt auch für die Erforschung von Plasmen, in denen Atomkerne und Elektronen voneinander gelöst vorliegen. Plasmen finden sich in der Sonne, wo sie durch Kernfusion, Wärme und Licht das Klima verändern. Aber auch an vielen Stellen des Alltags spielen Plasmen eine bedeutende Rolle. In der Vision der unbegrenzten Energieerzeugung durch Fusionskraftwerke müssen hochenergetische Plasmen sogar eingefangen und kontrolliert werden. Die genannten Forschungsgebiete sind typische Themen der Max-Planck-Gesellschaft. Sie dienen dem Erkenntnisgewinn, ermöglichen aber zudem ein exakteres Bild des Universums und fordern vielerlei neue technische Anwendungen heraus, die dann oft auch anderweitig zum Einsatz kommen.

### ENTWICKLUNG DES KOSMOS

24



### TEILCHEN- UND ASTROTEILCHENPHYSIK

26



### PLASMAFORSCHUNG – DEN STOFF DES UNIVERSUMS VERSTEHEN

28



MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN

Die Astrophysik erlebt zurzeit einige entscheidende Durchbrüche etwa bei der Vermessung der „Dunklen Materie“ und der „Dunklen Energie“ sowie bei der Entdeckung von Schwarzen Löchern und extrasolaren Planeten. Wichtige Forschungsthemen der Zukunft befassen sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzem, von Galaxien und massereichen Schwarzen Löchern sowie von Sternen und Planetensystemen. Neue Beobachtungsmöglichkeiten gehen dabei Hand in Hand mit der Beantwortung fundamentaler astrophysikalischer Fragen. Zukünftige Großteleskope im gesamten Bereich des elektromagnetischen Spektrums werden überwiegend in globaler Kooperation entwickelt und finanziert.

## ENTWICKLUNG DES KOSMOS

### Dunkle Energie dominiert das Universum

Die Astrophysik erlebt im Moment eine goldene Phase: Neue Teleskope in allen Wellenlängenbereichen, empfindlichste Detektoren und neue Beobachtungsfenster ins All versprechen ein riesiges Potenzial, welches mit neuen Herausforderungen an die theoretische Astrophysik einhergeht. Forscherinnen und Forscher in Deutschland, insbesondere in der Max-Planck-Gesellschaft, spielen in diesem international verbundenen Feld eine wichtige Rolle. Oft sind sie sogar führend.

Die Frage nach dem Ursprung und der Entwicklung des Universums, der darin enthaltenen Objekte und deren Verhalten bestimmenden physikalischen Gesetze, stehen im Zentrum der Astrophysik. In den vergangenen Jahren gab es gleich an mehreren Stellen bedeutende Fortschritte und Paradigmenwechsel: Ein entscheidender Durchbruch gelang in punkto Verständnis der Expansion des Universums. Die Inflationstheorie des Urknalls ergab konkrete Vorhersagen, die in letzter Zeit mit hoher Genauigkeit bestätigt werden konnten – beispielsweise über minimale räumliche Oszillationen in der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Aufgrund dieser Erkenntnis und mithilfe von Beobachtungen weit entfernter Supernova-Explosionen sowie Röntgenmessungen an Galaxienhaufen konnten die Geometrie des Raumes und die mittlere Dichte im Kosmos abgeschätzt werden. Fazit: Die Materie im Kosmos wird von einer bisher unbekannt Teilchenform, der so genannten Dunklen Materie dominiert. Überraschend war auch der Befund, dass die gesamte Materie nicht ausreicht, um das Universum zusammenzuhalten. Der Kosmos wird sich deshalb vermutlich bis in alle Ewigkeit weiter ausdehnen. Noch unerwarteter war die Erkenntnis, dass sich die Ausdehnung des Univer-

sums immer noch beschleunigt. Dies lässt auf eine bisher unverstandene Dunkle Energie schließen, die das heutige und zukünftige Universum dominiert.

Die Kosmologie im Großen hängt unmittelbar mit der Physik des Kleinsten zusammen. Gerade neue Entdeckungen in der Astrophysik hatten in den vergangenen Jahrzehnten zur Folge, dass die Grenzen des Standardmodells der Teilchenphysik erweitert und beispielsweise die Neutrino-Oszillationen überhaupt entdeckt werden konnten. Die derzeit größte Herausforderung ist die Vereinigung der Relativitätstheorie mit der Quantentheorie. Die neuen Entdeckungen in der Kosmologie führen die modernen Teilchentheorien, wie die Superstring- und Brane-World-Theorie, zu einer Zerreißprobe und weisen möglicherweise den Weg zu einem neuen Verständnis der Ruheenergie des Vakuums.

### Paradigmenwechsel bei den Schwarzen Löchern

Ein Paradigmenwechsel hat auch bei den Schwarzen Löchern stattgefunden, die oft als sehr exotische und möglicherweise rein theoretische Konstrukte angesehen wurden. Inzwischen wurden Objekte entdeckt und untersucht, die wahrscheinlich Schwarze Löcher sind. In unserer Milchstraße sind Schwarze Löcher von wenigen Sonnenmassen bekannt, die so genannten Stellaren Schwarzen Löcher. Im Zentrum unserer Milchstraße wurde ein massereiches Schwarzes Loch von mehreren Millionen Sonnenmassen ausgemacht. Darüber hinaus existieren massereiche Schwarze Löcher im Zentrum fast aller großen, nahen Galaxien. Statistische Untersuchungen zeigen, dass diese Schwarzen Löcher schon sehr früh im Universum entstanden sein müssen, vermutlich zusammen mit den ersten Sternen und Galaxien.

Ein weiterer Durchbruch ist bei der Entdeckung der extrasolaren Planeten gelungen. Bis heute sind über 100 extrasolare Planeten bekannt, darunter auch erste Mehrfachsysteme. Die bisher gefundenen Objekte weisen auf eine große Diversität unter den Planetensystemen hin. So wurden vor kurzem Planetensysteme entdeckt, die unserem Sonnensystem ähnlich sein könnten. Vielleicht existieren in zehn Jahren so empfindliche Teleskope, die erdähnliche Planeten in anderen Sonnensystemen abbilden oder sogar Anzeichen von Leben auf anderen Planeten finden können. „Unser“ Stern, die Sonne und unser Planetensystem eignen sich gut, um fundamentale physikalische Grundlagen und die kosmische Entwicklung im Detail zu studieren. *In-situ*-Messungen auf Planeten, Kometen und im Sonnenwind erlauben direkte Aussagen über die Zusammensetzung und Entwicklung des präsolaren Nebels. Interstellare Materie, die Weltraummissionen mitbringen, wird im Labor auf ihre Isotopenzusammensetzung hin untersucht, um daraus Rückschlüsse über die Entstehung schwererer Elemente in entwickelten Sternen und die physikalischen Mechanismen bei Supernova-Explosionen abzuleiten.

#### Auf der Suche nach erdähnlichen Planeten

In der Denkschrift der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) „Status und Perspektiven der Astrophysik in Deutschland“ werden die wichtigsten Forschungsthemen der Zukunft vorgestellt, die sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzem, von Galaxien und massereichen Schwarzen Löchern sowie von Sternen und Planetensystemen befassen. Konkrete Aufgabenstellungen sind hierbei etwa die Bestimmung der exakten Geometrie des Universums, die Erforschung der Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie, die Entdeckung von Gravitationswellen, die Entdeckung der ersten Galaxien, der ersten Schwarzen Löcher und der ersten Stern-



Auf dem chilenischen Chajnantor-Hochplateau entsteht das in globaler Zusammenarbeit entwickelte und finanzierte Atacama Large Millimeter Array, mit 64 Antennen für den Millimeter- und sub-Millimeterbereich.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Astronomie, Heidelberg
- MPI für Astrophysik, Garching
- MPI für Chemie, Mainz
- MPI für extraterrestrische Physik, Garching
- MPI für Gravitationsphysik, Golm/Hannover
- MPI für Mathematik, Bonn
- MPI für Radioastronomie, Bonn
- MPI für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau

generation, das Studium von Sternexplosionen und die Verschmelzung kompakter Objekte sowie die Enträtselung der Gammastrahlen-Ausbrüche, die Entstehung von Sternen und Planetensystemen und nicht zuletzt die Suche nach biologischer Aktivität auf extrasolaren Planeten. An all diesen Aktivitäten hat die Max-Planck-Gesellschaft große Anteile.

Neue Beobachtungsmöglichkeiten gehen dabei Hand in Hand mit der Beantwortung fundamentaler astrophysikalischer Fragen: Galaxien im frühen Universum werden im langwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums mit dem Flugzeugteleskop SOFIA, dem ESA-Infrarotsatelliten Herschel und dem James Webb Space Telescope (JWST) von NASA und ESA beobachtet. Vom Boden aus erlauben adaptive Optik und Interferometrie mit dem Very Large Telescope Interferometer der ESO und dem Large Binocular Telescope (LBT) höchst aufgelöste Bilder. Das in globaler Zusammenarbeit entwickelte Atacama Large Millimeter Array, mit 64 Antennen auf dem chilenischen Chajnantor-Hochplateau (siehe Foto), kann vom Jahr 2010 an Staub- und Gasmassen selbst der entferntesten Galaxien und protoplanetaren Scheiben räumlich auflösen und deren Struktur und Dynamik untersuchen. Mit der ESA-Mission Darwin wird es möglich sein, erdähnliche Planeten zu finden und nach Hinweisen für biologische Aktivität zu suchen. Das heiße und energiereiche Universum wird in neu aufgestoßenen Beobachtungsfenstern untersucht – zum Beispiel mit dem in der Antarktis entstehenden Neutrino-teleskop ICECUBE, mit den Tscherenkow-Teleskopen H.E.S.S. und MAGIC, mit der von der ESA und Japan geplanten Mission XEUS (X-ray Evolving Universe Spectroscopy) und dem Laser-Weltraum-Gravitationswellen-Interferometer LISA von ESA und NASA. Wichtige wissenschaftliche Ziele sind dabei die Vermessung des starken Gravitationsfeldes in der Nähe Schwarzer Löcher, das Studium der frühesten Schwarzen Löcher im Universum und die Messung von Gravitationswellen aus der Verschmelzung massereicher Schwarzer Löcher.

Im vergangenen Jahrzehnt wurde die Verzahnung zwischen der Physik der Elementarteilchen und der Astrophysik immer enger und intensiver. Die Untersuchung von Elementarteilchen aus dem Kosmos informiert einerseits über neue Eigenschaften dieser Teilchen und eröffnet andererseits ein neues Fenster zum Kosmos. Eine zentrale Frage der modernen Astrophysik und Teilchenphysik ist die Suche nach den mysteriösen Teilchen, welche die Dunkle Materie bilden und einen Großteil der Masse im Universum darstellen. Das Thema wird von verschiedenen Seiten angegangen. Am LHC-Speicherring im CERN können die Teilchen der Dunklen Materie potenziell in hochenergetischen Kollisionen erzeugt werden. Mit hochempfindlichen Detektoren in Untergrundlabors wollen die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen die geringen Rückstöße sichtbar machen, die übertragen werden, wenn Teilchen der Dunklen Materie im Halo der Milchstraße mit Atomkernen kollidieren. Große Teleskopsysteme schließlich könnten die Vernichtungsstrahlung nachweisen, die durch den Zusammenstoß solcher Teilchen in den Zentren von Galaxien entstehen.

## TEILCHEN- UND ASTROTEILCHENPHYSIK

### Der „dunklen Welt“ auf der Spur

Zu den fundamentalen Fragen der Grundlagenforschung gehört die Physik des ganz Kleinen, also die Suche nach den Grundbausteinen der Materie und nach den Kräften, die diese Grundbausteine zusammenhalten. Dazu gehört aber auch die Physik des ganz Großen: das Verständnis von Entstehung, Entwicklung und Struktur unseres Universums. Speziell im vergangenen Jahrzehnt ist immer offensichtlicher geworden, dass diese beiden extremen Gebiete der Physik direkt miteinander verbunden sind und miteinander interagieren. Dies gilt einmal im Methodischen: Die Erde ist einem steten Strom von Elementarteilchen aus dem Weltall ausgesetzt – Atomkernen, Gammastrahlen, Neutrinos. Aus dem Nachweis und Studium dieser Teilchen resultieren neuartige und zur klassischen Astronomie komplementäre Informationen über den Kosmos. Kosmische Strahlungsquellen zeichnen sich durch sehr hohe Energien, extreme Intensitäten und gigantische Entfernungen aus. Neue Eigenschaften der Teilchen zeigen sich, die

auf den für irdische Teilchenbeschleuniger relevanten Skalen nicht oder nur schwer sichtbar sind. Die Entwicklung des Universums und die Entstehung der Strukturen im Kosmos werden dominiert durch neue und unbekannte Formen der Materie: die Dunkle Materie und die Dunkle Energie. Die Identifizierung dieser „dunklen Welt“ ist heute eines der fundamentalsten Probleme physikalischer Grundlagenforschung. Die Suche nach Teilchen der Dunklen Materie stellt ein Beispiel für eine aktuelle Forschungsfrage der Teilchen- und Astroteilchenphysik in der Max-Planck-Gesellschaft dar.

### Der Nachweis einer „Spiegelwelt“

So genannte supersymmetrische Teilchen sind eine Möglichkeit, die fehlende Dunkle Materie entsprechend dem jetzigen physikalischen Weltbild zu klären. Supersymmetrie-Theorien und den noch allgemeineren Superstringtheorien zufolge existiert parallel zu der uns bekannten Welt der Elementarteilchen eine Spiegelwelt. In dieser Spiegelwelt hat jedes fundamentale Teilchen ein Partnerteilchen, das sich durch seinen Drehimpuls von dem normalen Teilchen unterscheidet und eine sehr viel größere Masse hat. Falls solche Teilchen existieren, wären sie wie unsere normale Materie mit der hohen Energie des Urknalls erzeugt worden, und die leichtesten und stabilen supersymmetrischen Teilchen könnten bis heute überlebt haben. Jeder Kubikmeter Raum in unserer Galaxis und auf der Erde sollte demnach einige Tausend dieser Teilchen enthalten. Dieser Nachweis ist jedoch extrem schwierig, da

MPI für Physik/Siegfried Beutke



Blick in die unterirdische Halle des ATLAS-Experiments am LHC. Das erste 400 Tonnen schwere Detektorteil wird heruntergelassen und für die Montage des 44 Meter langen und 22 Meter hohen ATLAS-Detektors vorbereitet. 1800 Physiker und Ingenieure aus 150 Instituten in 35 Ländern sind daran beteiligt.

die Teilchen mit normaler Materie nur minimal wechselwirken: Ihr Einfluss macht sich primär durch die Gravitation, also durch die Massenanziehung auf kosmischen Skalen bemerkbar.

Um die Teilchen der Dunklen Materie aufzuspüren, werden von den Max-Planck-Instituten für Physik in München und für Kernphysik in Heidelberg verschiedene Lösungsansätze verfolgt: Zum einen sollen solche Teilchen gezielt am neuen LHC-Beschleuniger im CERN erzeugt werden, zum anderen sollen hochempfindliche Detektoren die lokal vorhandene Dunkle Materie nachweisen. Schließlich können die Forscher und Forscherinnen die Vernichtungsstrahlung suchen, die erzeugt wird, wenn sich Teilchen der dunklen Materie im Zentrum unserer Galaxis anreichern und sich gegenseitig vernichten. Der LHC-Speicherring am CERN soll 2007 in Betrieb gehen. In ihm kollidieren



H.E.S.S. Kollaboration

Die namibische Landschaft und ein weiteres Teleskop spiegeln sich im Reflektor eines der H.E.S.S.-Teleskope. Das H.E.S.S.-System besteht aus vier großen Teleskopen und weist hochenergetische Gammastrahlung aus dem Kosmos nach.

zwei gegenläufige hochenergetische Protonenstrahlen. Neuartige Elementarteilchen mit bis zur 1000-fachen Masse eines Wasserstoffatoms können in diesen Reaktionen erzeugt werden und damit potenziell auch die supersymmetrischen Teilchen der Dunklen Materie – falls sie existieren. Um die Kollisionsprodukte zu analysieren, sind komplexe Teilchendetektoren mit vielen Millionen Nachweiselementen erforderlich. Einer davon ist der ATLAS-Detektor, an dessen Konstruktion das Max-Planck-Institut für Physik wesentlich beteiligt ist. Ein weiteres wichtiges Ziel der LHC-Experimente wird die Suche nach dem hypothetischen Higgs-Teilchen sein, das in der Theorie der Elementarteilchen eine Schlüsselrolle einnimmt.

#### Annäherungsversuche an die Dunkle Materie

Ein direkter Nachweis der Teilchen der Dunklen Materie stellt höchste Anforderungen an die Experimentalphysiker.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Kernphysik, Heidelberg
- MPI für Physik, München

Eine Messidee geht auf Münchner Physiker zurück: In unserer Galaxis gebundene Teilchen der Dunklen Materie bewegen sich mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde. Ganz selten wird eines dieser Teilchen mit einem Atomkern zusammenstoßen und einen geringen Rückstoß auf diesen übertragen. Nötig sind also Detektoren großer Masse, um viele Stoßkerne anzubieten. Gleichzeitig müssen die Detektoren im Stande sein, solche Rückstöße nachzuweisen und von zahllosen Störquellen zu trennen. Das CRESST-Experiment versucht dies durch tiefgekühlte Kristalle zu erreichen. Bei Temperaturen von einigen Millikelvin (mK) reicht ein minimaler Energieeintrag, um den Kristall messbar zu erwärmen. Die Entwicklung der hochempfindlichen Kryodetektoren beinhaltet ein interessantes Spektrum sowohl festkörperphysikalischer Grundlagenfragen wie auch direkter technischer Anwendungen. Ähnlich empfindliche Detektoren werden auch in Experimenten eingesetzt, die über seltene doppelte Beta-Zerfälle die Masse der Neutrino teilchen und damit deren vermutlich eher kleinen Beitrag zur Dunklen Materie präzisieren sollen.

Der dritte Ansatz zum Nachweis Dunkler Materie nutzt Instrumente der Hochenergie-Astrophysik, die von der Max-Planck-Gesellschaft im Rahmen internationaler Kooperationen in den vergangenen Jahren aufgebaut wurden: Mit den H.E.S.S.- und MAGIC-Teleskopen werden hochenergetische Gammaquanten aus dem Kosmos gemessen, um kosmische Teilchenbeschleuniger zu identifizieren und abzubilden. Die Paarvernichtung von Teilchen der Dunklen Materie erzeugt ein charakteristisches Spektrum hochenergetischer Gammastrahlung, aus dem die Masse und andere Eigenschaften der Teilchen abgeleitet werden können.

Dieses Beispiel zeigt, wie eng Teilchenphysik und Astrophysik bei der Suche nach Teilchen der Dunklen Materie zusammengewachsen sind und wie experimentelle Techniken aus einem Gebiet in das andere übertragen werden. Die Arbeitsgruppen stehen in den kommenden Jahren noch vor erheblichen Herausforderungen wie dem Aufbau und der Inbetriebnahme der riesigen und komplexen Detektoren am LHC und der kontinuierlichen Weiterentwicklung der anderen Instrumente. Das Fernziel – die Entdeckung und Beschreibung der neuen Welt der Dunklen Materie und der Elementarteilchen – lohnt jedoch den großen Aufwand.

Plasmaforschung in der Max-Planck-Gesellschaft beschäftigt sich mit einem Themenspektrum, das von dynamischen Vorgängen in astrophysikalischen Objekten bis hin zu turbulenten Strömungen in magnetisch eingeschlossenen Kernfusionsplasmen auf der Erde reicht. Dabei nutzen die Forscher und Forscherinnen Gemeinsamkeiten von experimentellen diagnostischen Methoden und theoretischen Beschreibungen. Durch dieses enge Wechselspiel von Theorie und Experiment sind in der Vergangenheit enorme Fortschritte im Verständnis erzielt worden. Zukünftige weltweit geplante Forschungsprojekte wie der SOLAR ORBITER-Satellit oder das Kernfusionsexperiment ITER – in Verbindung mit den weiterhin rasant zunehmenden Möglichkeiten für numerische Computersimulation – werden zu einer neuen Qualität des Verständnisses von Plasmen führen. Aufgrund des breiten Forschungsfeldes wirkt sich dies auf Gebiete wie die Vorhersage des Weltraumwetters, das Verständnis von Sternexplosionen oder die Kontrolle der Kernfusion aus.

## PLASMAFORSCHUNG – DEN STOFF DES UNIVERSUMS VERSTEHEN

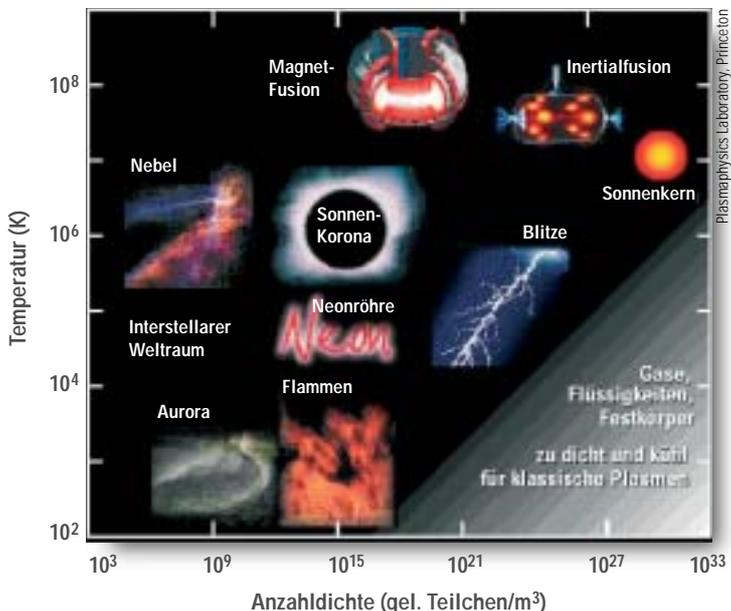
### Starkes Wechselspiel von Theorie und Experiment

Der größte Teil der leuchtenden Materie im Weltall befindet sich im Plasmazustand. Hierbei handelt es sich um ionisierte Gase, bei denen die Atome größtenteils in Kern und Elektronen zerlegt sind. Plasmen kommen in einer großen Dichte- und Temperaturspanne vor, beispielsweise im Sonneninneren mit 30-facher Festkörperdichte und Temperaturen von mehr als zehn Millionen Grad oder in einer Leuchtstoffröhre mit 10 000 Grad und einer Dichte, die nur etwa einem Tausendstel der Dichte der Erdatmosphäre entspricht (siehe Abb. unten). Solche Plasmen haben aufgrund der Teilchenladung eine intensive Wechsel-

wirkung mit elektromagnetischen Feldern, wobei die Teilchenbewegung einerseits durch die Felder beeinflusst wird, andererseits aber die Teilchen auch die Felder verändern.

Ein interessantes Gebiet der Plasmaforschung ist die Physik stoßarmer Plasmen: Sie befasst sich mit besonders heißen oder verdünnten Plasmazuständen, oftmals fernab des thermodynamischen Gleichgewichts. Diese Art der Plasmaphysik spielt sowohl in der Astrophysik im Hinblick auf die Sonne und die sie umgebende Heliosphäre eine Rolle als auch in Experimenten zur kontrollierten Kernfusion auf der Erde. Die Forscher und Forscherinnen der Max-Planck-Gesellschaft nutzen auf den unterschiedlichen Gebieten der Plasmaforschung die Gemeinsamkeiten bei der theoretischen Beschreibung, aber auch bei der Entwicklung von Messmethoden (Diagnostik). Das Wechselspiel von Theorie und Experiment ist auf diesem Gebiet besonders stark ausgeprägt: Die Verbindung von numerischer Modellierung und immer trickreicherer Experimentierkunst führt dabei zu einer neuen Qualität des Verständnisses, bei dem *Ad-Hoc*-Annahmen durch grundlegende Modelle ersetzt werden. Für die Untersuchung stoßarmer Plasmen verfügt die Max-Planck-Gesellschaft über eine herausragende Plasmadiagnostik in Verbindung mit guten Möglichkeiten der Modellierung. Diese Möglichkeiten sollen in der nächsten Dekade stark erweitert werden mit neuen internationalen Großprojekten wie dem Forschungsreaktor ITER, der zum ersten Mal auf der Erde ein brennendes Kernfusionsplasma erzeugen soll, oder der SOLAR ORBITER-Mission, welche sich der Sonne so nah wie keine Mission zuvor annähern wird.

Plasmen treten in einem großen Dichte- und Temperaturbereich auf.





### Weltraumwetter bestimmt künftige Nutzung des erdnahen Raumes

Ein Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Untersuchung großskaliger Instabilitäten in magnetisierten Plasmen. In magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen begrenzen sie den Plasmadruck und somit die theoretisch erreichbare Fusionsleistung. Durch ein Verständnis der zu Grunde liegenden physikalischen Prozesse können aktive Kontrollmechanismen entwickelt werden, die es erlauben, den Plasmadruck zu erhöhen. Auch in natürlichen Plasmen sind großskalige Instabilitäten wichtig: Sie kontrollieren in der Sonnenatmosphäre den Einschluss des weitgehend stoßfreien Plasmas der Korona. Geht der Einschluss verloren, entlädt sich ein großer Teil des Plasmas als gewaltige magnetische Wolke in den Raum (siehe Abb. unten). Ein Verständnis dieser Eruptionen und der Wechselwirkung der magnetischen Wolken mit der Magnetosphäre der Erde, also des Weltraumwetters, sind von entscheidender Bedeutung für die zukünftige Nutzung des erdnahen Weltraums.

### Dynamoprosesse erzeugen großräumige Magnetfelder

Ein anderer Schwerpunkt ist die Untersuchung turbulenter Plasmaströmungen. In der Astrophysik bilden turbulente Gasströmungen in rotierenden Systemen die Grundlage faszinierender Dynamoprosesse. Diese erzeugen die großräumigen Magnetfelder der Planeten, der Sonne und anderer Sterne sowie ganzer Galaxien. Oftmals befinden sich die in der Astrophysik untersuchten Plasmen in extremen Zuständen. So finden sich stark entartete Plasmen in den von quantenmechanischen Effekten dominierten Weißen Zwergen, in den Zentralregionen hochentwickelter massereicher Sterne, in hochrelativistischen Plasmen in der Umgebung von Schwarzen Löchern und extrem magnetisierten Plasmen auf der Oberfläche von Neutronen-

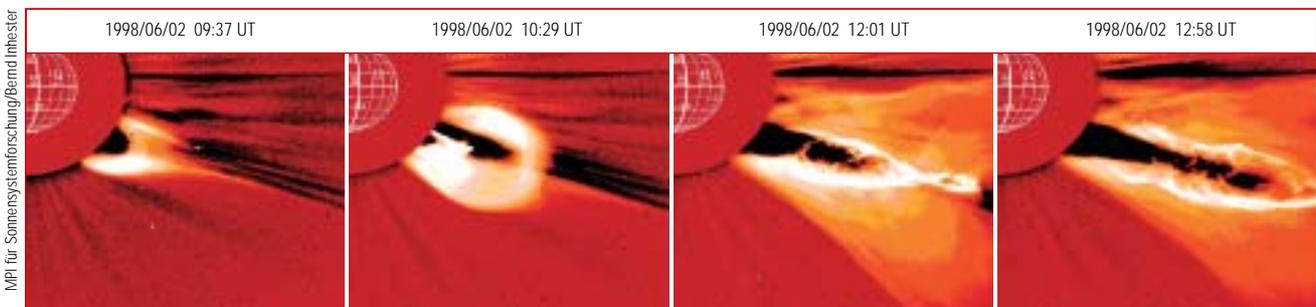
### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Astrophysik, Garching
- MPI für extraterrestrische Physik, Garching
- MPI für Plasmaphysik, Garching und Greifswald
- MPI für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau

sternen. Die Simulation ihrer komplexen mehrdimensionalen Dynamik unter dem Einfluss externer Gravitationsfelder oder ihrer Eigengravitation ist ein zentrales und aktuelles Forschungsgebiet der Astrophysik. So gelang es Astrophysikern zusammen mit angewandten Mathematikern erst in den vergangenen zehn Jahren, geeignete numerische Verfahren zu entwickeln, um das Verhalten extrem relativistischer Plasmen in starken Gravitationsfeldern zu simulieren.

### Gezielte Verbesserung von Kernfusionsexperimenten

Ein ähnlich komplexes Gebiet ist die Untersuchung von gradientengetriebener Plasmaturbulenz, die den Wärmeverlust aus magnetisch eingeschlossenen Kernfusionsplasmen bestimmt. Diese legt die zur Wärmeisolation erforderliche Größe des Plasmaquerschnitts – im Anlagenzentrum werden heute schon Temperaturen von 200 Millionen Grad erreicht – und damit die Größe der gesamten Anlage fest. Hier wurde in der jüngsten Vergangenheit durch das Wechselspiel von Theorie und Experiment zum ersten Mal grundlegendes Verständnis erreicht, das zur gezielten Verbesserung von Kernfusionsexperimenten verhilft. Physikalisches Know-how und technische Kontrolle entscheiden über die Realisierbarkeit eines zukünftigen Fusionsreaktors.



Eruption einer Plasmawolke aus der Sonnenkorona. Die Strukturen der Wolke deuten auf das einschließende Magnetfeld hin. Die Sonne selbst ist abgedeckt (Foto links).

MPI für Sonnensystemforschung/Bernd Inhester

## RAUMSCHIFF ERDE

Um auch kommenden Generationen eine lebenswerte Existenz auf der Erde zu ermöglichen, muss mit Ressourcen im Einklang mit der Natur umgegangen werden. Der Anspruch auf Nachhaltigkeit ist inzwischen von der UN als menschliches Grundrecht anerkannt. Das motiviert die Grundlagenforschung stark. Verstehen wollen die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, wie menschlicher Einfluss in den Lebensraum Erde eingreift und ihn verändert. Dazu müssen geowissenschaftlich die großen Stoffströme, ihre Kopplungen und „Empfindlichkeiten“ analysiert werden. Da gesellschaftlich ein restriktives Vorgehen in punkto Klimaschutz nicht durchsetzbar ist, stellen Entwicklungen wie die abnehmenden Vorräte an fossilen Brennstoffen spezifische Anforderungen an Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaft: Grundlagenforschung muss Alternativen zu herkömmlicher Energie-

gewinnung oder Umweltgiften aufzeigen. Auch die Biologie bietet Lösungen: Die großen Stoffströme wie Luft, Wasser und Schadstoffe werden großteils von Mikroorganismen kontrolliert, über die noch wenig bekannt ist. Die Untersuchung der Mikroorganismen ist für das Aufstellen von verlässlichen Erdmodellen notwendig. Zudem ermöglichen neue Bakterien mit neuen Enzymen neue Prozesse und Kreisläufe. Die folgenden drei Beiträge zeigen, dass die Max-Planck-Gesellschaft den Themenbereich der Nachhaltigkeit offen, zukunftsorientiert sowie interdisziplinär angeht und versucht, der Gesellschaft das notwendige Rüstzeug an die Hand zu geben. Die Max-Planck-Gesellschaft sieht es auch als ihre Aufgabe an, politische Entscheidungen durch exaktere Schadensmodelle zu unterstützen und technologische Alternativen aufzuzeigen.



### DAS SYSTEM ERDE

31



### GRUNDLAGEN EINER NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG

34



### MIKROBIOLOGIE VON UMWELTPROZESSEN

37

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN



Der globale Wandel beeinflusst alle Komponenten des Erdsystems: Ozeane, Atmosphäre, feste Erde, Biosphäre und Menschen. Um sich den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen des globalen Wandels stellen zu können, müssen diese Komponenten als wechselwirkende Teile eines integralen Systems erforscht und ihre Wechselwirkungen und Rückkopplungen verstehen gelernt werden. Die Max-Planck-Institute in Mainz, Hamburg und Jena planen zusammen mit weiteren Partnerinstituten einen integrierten Ansatz zur Erforschung des Erdsystems mit Schwerpunkt auf den Wechselwirkungen zwischen menschlichen Aktivitäten, Landökosystemen, Ozeanen und Atmosphäre. Hierbei sollen Flugzeugmessungen, Fernerkundung und Modellierung zum Einsatz kommen. Das aus dieser Forschung erwachsende Verständnis des Erdsystems und seiner Wechselwirkungen ist eine grundlegende Voraussetzung für die Definition von wirtschaftlichen und politischen Strategien zur optimalen und nachhaltigen Nutzung der Ressourcen unseres Planeten.

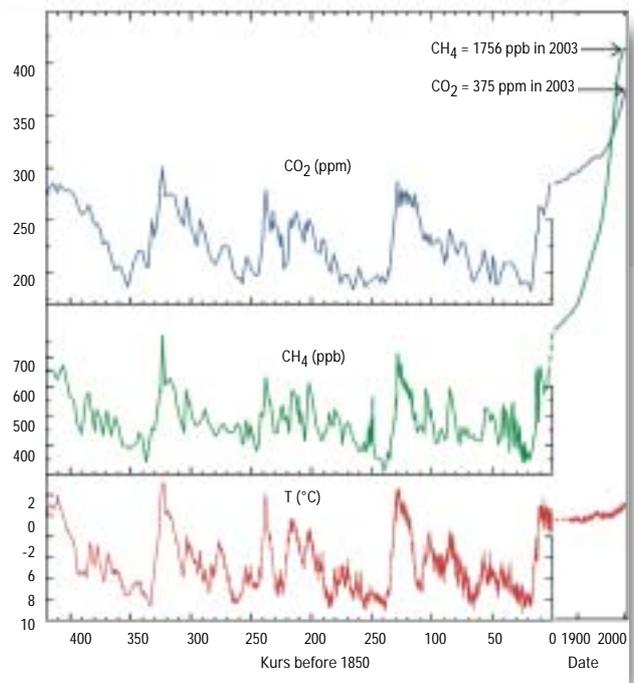
## DAS SYSTEM ERDE

### Globaler Wandel beeinflusst auch wissenschaftliche Disziplinen

In den letzten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts hat sich eine fundamentale Wende im Denkansatz der Wissenschaften von der Erde vollzogen. Bisher hatten die einzelnen Komponenten des Erdsystems im Vordergrund gestanden und waren von getrennten Disziplinen erforscht worden: die Ozeane von der Meereskunde, die Atmosphäre von der Meteorologie und Klimaforschung, die feste Erde von Geologie und Geophysik. Mit dem dramatischen Anwachsen des Einflusses menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt aber wurde deutlich, dass sich unsere Umwelt nicht nur im globalen Maßstab verändert („Globaler Wandel“), sondern auch quer durch alle Komponenten des Erdsystems und damit alle wissenschaftlichen Disziplinen. Mehr noch: Es stellte sich heraus, dass jede Änderung einer Komponente das ganze System beeinflusst. Wird zum Beispiel die Zusammensetzung der Atmosphäre durch Zugabe von Kohlendioxid verändert, so erwärmt sich das Klima, der Meeresspiegel steigt und Pflanzen wachsen schneller. Diese Veränderungen wiederum beeinflussen die Zusammensetzung der Atmosphäre, wodurch vielfache Rückkopplungen und Querverbindungen entstehen.

Eine Art Rosettastein des Erdsystems ist die in den antarktischen Eiskernen aufgezeichnete Geschichte der Luftzusammensetzung und der Temperatur. Über 400 000 Jahre hinweg steigen und fallen im Gleichschritt die Temperatur der Erde und die Konzentrationen der beiden Spurengase Methan und Kohlendioxid, die von unterschiedlichen biologischen Prozessen reguliert werden. Die Frage nach einem einfachen Zusammenhang führte in eine Sackgasse: Weder kann eine extern angetriebene Temperaturänderung die Fluktuationen der biogenen Spurengase erklären, noch

reichen deren Variationen aus, um die Klimaänderungen zu bewirken. Es ist die moderne Sichtweise, dass die Biosphäre und ihre geophysikalische und geochemische Umwelt ein Netzwerk oder System mit vielfachen und komplexen Rückkopplungen bilden, das nur durch einen systemaren Ansatz erforscht und verstanden werden kann. Es ist eine der wichtigen Folgerungen, dass die Biosphäre auf der Erde

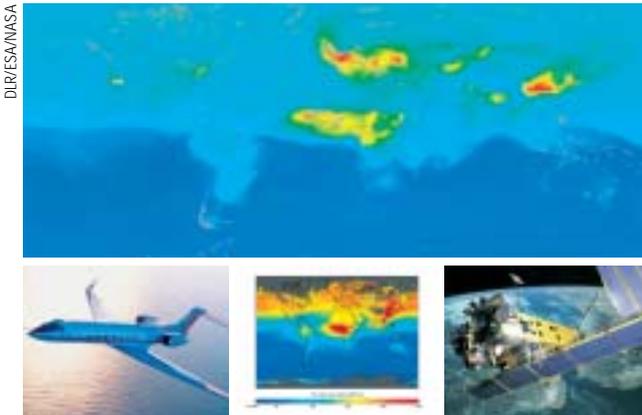


Zeitlicher Verlauf der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid und Methan, und der Temperatur der Atmosphäre. Der linke Teil der Abbildung stellt den in Eisbohrkernen aufgezeichneten Verlauf dar (in Jahrtausenden vor der Gegenwart, nach Petit, et al., 1999), der rechte Teil den instrumentell gemessenen Verlauf seit 1850 (J. Hansen, NASA, Goddard Institute for Space Studies, 2004).

das Potenzial besitzt, das Erdsystem wesentlich zu beeinflussen. Davor bestand die Sichtweise, dass das physikalisch-geologische Klimasystem das Primat besitzt und sich biologische Prozesse diesem unterordnen und sich durch die Evolution den physikalischen Gegebenheiten anpassen.

#### Doppelter Forschungsblick auf das System Erde

Diese neue Blickweise in den Wissenschaften von der Erde erzwingt einen doppelten Forschungsansatz: Einerseits ist es nach wie vor unumgänglich, die Prozesse und Zustände in den Komponenten des Erdsystems zu erforschen – wie etwa die Zirkulation der Ozeane, die Zusammensetzung der Atmosphäre und die sie regelnden Mechanismen. Dazu kommt aber nun die Notwendigkeit, diese Komponenten als Teile eines Systems zu analysieren und die Wechselwirkungen sowie Rückkopplungen in diesem System zu erforschen. Der durchgreifende Einfluss des Menschen auf seine Umwelt macht es notwendig, auch ihn als Teil des Systems Erde zu verstehen.



Ein integrierter Ansatz zur Erforschung des Erdsystems erfordert Messkampagnen, Fernerkundung und numerische Modellierung. Diese Komponenten sind hier dargestellt durch das Forschungsflugzeug HALO (links), den Satelliten Envisat (rechts), die aus dem Weltraum gemessene globale Verteilung des Kohlenstoffmonoxids (Mitte) und die mit einem numerischen Modell vorhergesagte Verteilung desselben Spurengases.

Die erforderlichen methodischen Ansätze der Erdsystemforschung können in drei Gruppen geteilt werden: Messungen und Experimente vor Ort sind notwendig, um vor allem Prozesse innerhalb der Komponenten zu untersuchen, beispielsweise die chemischen Reaktionen in der Atmosphäre, den Gasaustausch zwischen Pflanzen und Luft oder die Niederschlagsbildung in Wolken. Zweitens ist es notwendig, die Erde auf großen Zeit- und Raumskalen zu untersuchen, um regionale, globale und langfristige Vorgänge und Änderungen zu verstehen. Zur Erfassung globaler oder kontinentaler Phänomene ist die Nutzung und Analyse von Da-

ten aus Satelliten-Experimenten unersetzlich. Die langen Zeitskalen im Erdsystem erfordern langfristige Messungen an ausgewählten Standorten und die Untersuchung natürlicher „Archive“ wie Eisbohrkerne oder Sedimentprofile. Das dritte Standbein der Erdsystemforschung ist die Modellierung: Numerische Modelle sind das theoretische Werkzeug zur Erforschung der Zusammenhänge im Erdsystem. Sie sind die einzige „Sprache“, in der sich die komplexen Prozesse im System Erde und seinen Komponenten qualitativ und quantitativ ausdrücken lassen. Aufgrund der vielfachen Wechselwirkungen und Rückkopplungen im Erdsystem entzieht sich die Analyse der Auswirkungen von Störungen – beispielsweise der Emission von Treibhausgasen, der großflächigen Änderungen der Landnutzung oder der Brandrodung – oft der simplen intuitiven Analyse und entspricht oft nicht den einfachen Erwartungen. Nicht selten treten dabei paradoxe Effekte auf. Nur durch Modelle lassen sich die vielfachen Interaktionen adäquat darstellen und untersuchen. Es ist allerdings nicht damit zu rechnen, dass in absehbarer Zeit das ganze Erdsystem in einem „Supermodell“ repräsentiert werden kann. Vielmehr werden Modelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt sowie Teilmodelle, die modular verknüpft werden können.

#### Forschungsvorhaben sind abgestimmt und eng verzahnt

Die hier diskutierte Forschungsproblematik erfordert die enge Zusammenarbeit der drei Max-Planck-Institute in Mainz, Jena und Hamburg, die der Erforschung der verschiedenen Komponenten des Erdsystems gewidmet sind. An einer Anzahl von weiteren Instituten gibt es Abteilungen und Gruppen, in denen ebenfalls erdsystemrelevante Forschung betrieben wird. Diese Institute und Gruppen sind dabei, ihre Forschungsarbeiten in einen größeren Zusammenhang der Erdsystemforschung zu stellen und ihre Arbeiten aufeinander abzustimmen.

Im Mittelpunkt der gemeinsamen Forschung stehen folgende Fragestellungen:

- Welche Rückkopplungen und Fernbeziehungen sind im Erdsystem besonders wichtig?
- Welche Regionen und Komponenten reagieren besonders empfindlich auf den Globalen Wandel?
- Gibt es kritische Schwellen, bei deren Überschreiten abrupte Änderungen im Erdsystem eintreten?
- Gibt es Möglichkeiten, das Erdsystem langfristig zu steuern?

Diese Arbeiten sind aufgrund ihrer globalen Bedeutung auch auf internationaler Ebene mit Großforschungsvorhaben, insbesondere dem International Geosphere-Biosphere Program, eng verzahnt.



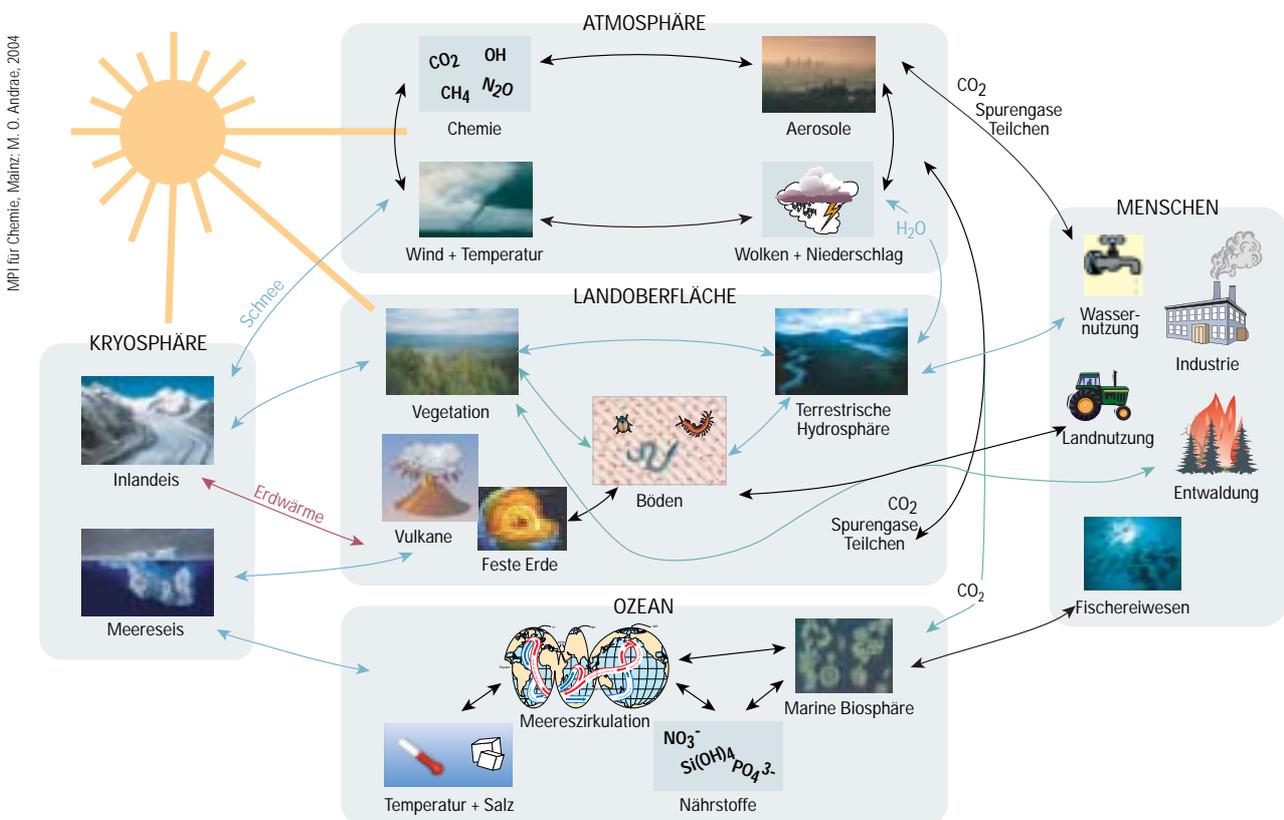
## Optimale und nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Langfristiges Ziel der Forschung ist es, ein Verständnis des Erdsystems zu entwickeln, mithilfe dessen die Menschen die Veränderungen in der Welt begreifen und informiert handeln können. Nur so lässt sich erfassen und wissenschaftlich begründen, welche politischen und wirtschaftlichen Maßnahmen zum Schutz des Erdsystems dringend notwendig sind und wie die natürlichen Ressourcen unseres Planeten optimal und nachhaltig genutzt werden können. Ein solides wissenschaftliches Verständnis der Zusammenhänge im Erdsystem ist auch die grundlegende Voraussetzung, um die teilweise schwierigen und einschneidenden Maßnahmen, wie eine drastische Reduzierung der Kohlendioxid-Emissionen, überzeugend gegenüber Politik und Gesellschaft zu begründen. Die große wissenschaftliche Breite der Max-Planck-Gesellschaft soll es ermöglichen, nicht nur die Schädigungen und Änderungen zu erfassen und zu verstehen, sondern gleichzeitig technologische und

### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biogeochemie, Jena
- MPI für Chemie, Mainz
- MPI für Kernphysik, Heidelberg
- MPI für marine Mikrobiologie, Bremen
- MPI für Meteorologie, Hamburg
- MPI für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau
- MPI für terrestrische Mikrobiologie, Marburg

ökonomische Alternativen im Bereich nachhaltiger Energieversorgung zu entwickeln. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass selbst diese Alternativen Auswirkungen auf das Erdsystem haben werden, die dann ebenfalls mit Szenarioanalysen in Erdsystemmodellen erforscht werden müssen.



MPI für Chemie, Mainz; M. O. Andreae, 2004

Konzeptionelles, stark vereinfachtes Modell des Erdsystems, in dem die wesentlichen Komponenten und Verbindungen dargestellt sind.

Die langfristige Versorgung mit Energie ist eine der großen Herausforderungen für die nächsten Jahrzehnte. Die Max-Planck-Gesellschaft untersucht dazu sowohl die Grundlagen der Kernfusion als auch grundlegende Fragen zu Wasserstoff als flexibel einsetzbarem Energieträger. Voraussetzung einer nachhaltigen Energieversorgung ist bei der zweiten Option die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen. In vielen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft wird grundlegend an Komponenten für ein auf Wasserstoff beruhendes Energie-Kreislaufsystem gearbeitet – angefangen bei verbesserten katalytischen Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff über Arbeiten zur Nachahmung der Photosynthese bis hin zur Speicherung von Wasserstoff in neuartigen Speichermedien. Ziel der Arbeiten ist dabei nicht die Entwicklung von technisch nutzbaren Prototypen, sondern die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für diese Systemkonzepte.

## GRUNDLAGEN EINER NACHHALTIGEN ENERGIEVERSORGUNG – DEZENTRALE LÖSUNGEN AM BEISPIEL DES WASSERSTOFFES

### Heute die Grundlagen für Morgen legen

Die Reserven an fossilen Rohstoffen, die derzeit die Basis unserer Energieversorgung bilden, gehen zunehmend schneller zurück: Zum einen werden weniger neue Vorkommen entdeckt, zum anderen steigt in vielen Ländern der Energieverbrauch stark an. Um zukünftigen Generationen weltweit einen ähnlichen Lebensstandard wie derzeit in den industrialisierten Ländern zu ermöglichen, müssen schon heute die Grundlagen für eine nachhaltige Versorgung mit Energie gelegt werden, wie sie in 20 bis 50 Jahren notwendig sein wird. Dieses Problem hat viele Facetten, die von den physikalisch-chemischen Grundlagen bis hin zur gesellschaftlichen Akzeptanz neuer Energieversorgungssysteme reichen. Viele davon werden in den verschiedenen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft bearbeitet. Sicher scheint, dass nicht ein einzelnes neues System den zukünftigen Energiebedarf befriedigen, sondern nur ein Bündel von Maßnahmen die steigende Nachfrage decken kann.

Abgesehen von der großen Vision zentraler Energieerzeugung durch Kernfusion, deren plasmaphysikalische Grundlagen in der Max-Planck-Gesellschaft (siehe den Beitrag zur Plasmaforschung im Kapitel „Mit dem Urknall anfangen“) und integriert auch auf europäischer und globaler Skala intensiv untersucht werden, erscheint derzeit ein Energiesystem, das auf Wasserstoff als mobilem Energieträger basiert, als sehr aussichtsreiche Variante. In einem solchen Szenario würde der Wasserstoff direkt aus regenerativen Quellen wie etwa Sonnenenergie oder Biomasse erzeugt werden. Der so erzeugte Wasserstoff könnte am effizientesten mittels Brennstoffzellen in elektrische Energie umgewandelt werden. Dabei entsteht Wasser als „Abfallgas“, der



MPI für Kohlenforschung/Uwe Endruschat

Lösungen unterschiedlicher Platin- und legierter Platin-Nanocluster, die auf ihre Eignung als effiziente Brennstoffzellen-Katalysatoren hin untersucht werden.

Kreislauf schließt sich. Ein solches wirtschaftlich-gesellschaftliches Szenario kann nun in wissenschaftliche Fragestellungen und erforderliche Schlüsselschritte aufgebrochen werden. Dabei wird die Katalyse auf den verschiedensten Ebenen eine entscheidende Rolle spielen, um die Vision Realität werden zu lassen. Zunächst sind katalytische Reaktionen grundsätzlich ressourcen- und energieeffizienter als nicht katalysierte Prozesse. Die Umstellung möglichst vieler Prozesse auf katalytische Varianten erlaubt es, den Einsatz von Primärenergie zu vermindern. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zur Schadstoffminimierung geleistet. Katalytische Prozesse sind aber auch mittelbar entscheidend, wenn Energiesysteme auf Wasserstoffbasis gebaut werden.

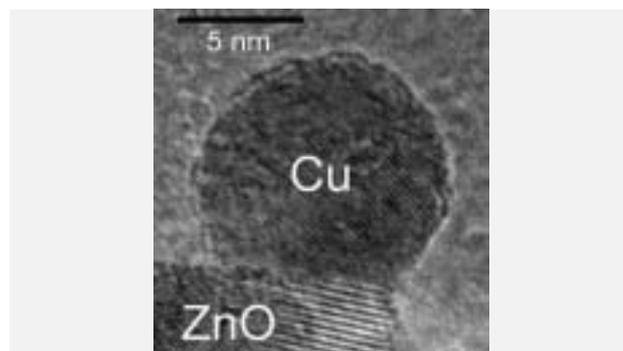
**Ziel: direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Wasserstoff**  
Derzeit wird Wasserstoff durch das so genannte Steam-Reforming aus Kohlenwasserstoffen erzeugt. Dies ist ein

seit vielen Jahrzehnten etablierter Prozess, der jedoch auf der Nutzung fossiler Primärenergie basiert. Langfristig sind grundsätzlich neue Wege zu finden, mit denen nachwachsende Rohstoffe direkt in Wasserstoff umgewandelt werden können – vorzugsweise solche Rohstoffe, die anders schwierig nutzbar sind. Alternativ dazu erscheint es hoch attraktiv, Solarenergie direkt für die Erzeugung von Wasserstoff zu nutzen, indem beispielsweise die natürliche Fotosynthese nachgeahmt wird. Auch wenn nicht mit kurzfristigen Durchbrüchen zu rechnen ist: Das biologische System zur Fotosynthese ist in seinen Grundzügen verstanden. Die Nachbildung des biologischen Fotosynthesystems durch einfachere, chemische Modelle wäre technisch spannend und könnte die Grundlage für die Entwicklung eines Verfahrens zur direkten Umwandlung von Sonnenlicht in Wasserstoff legen.

Im Gegensatz zum Solarstrom kann Wasserstoff oder ein chemischer Energieträger gespeichert und über große Strecken transportiert werden. Zudem kann die Energie abgerufen werden, wenn sie benötigt wird. Methanol ist eine derartige simple Transport- und Speicherform für Wasserstoff, da Verfahren zur Erzeugung („forming“) von Methanol aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid/Kohlendioxid (Synthesegas) schon seit langem etabliert sind. Ein Liter Methanol enthält rund 1000 Liter Wasserstoff und ist weit ungefährlicher in der Handhabung als das Wasserstoff-Gas. Am Ort des Verbrauchs kann das Methanol durch „reforming“ wieder in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt werden. Alle entscheidenden Schritte in dieser Reaktionskette sind katalytisch und bekannt. Dennoch besteht erhebliches Potenzial für Verbesserungen, besonders beim meist dezentralen „reforming“. Es existieren zwar Ka-

talysatoren, an denen diese Reaktion effizient abläuft, doch fällt momentan noch als Nebenprodukt Kohlenmonoxid an, das die Katalysatoren in der Brennstoffzelle vergiftet. Erste Forschungsergebnisse der Max-Planck-Gesellschaft geben Anhaltspunkte dafür, dass Katalysatoren mit gezielt eingestellter Nanostruktur diese Nebenreaktion stark unterdrücken. Wasserstoff könnte demnach als Produkt dieser Katalysatoren ohne weitere Reinigungsschritte direkt in der Brennstoffzelle eingesetzt werden.

Auch die direkte Umwandlung von Methan in Methanol als Teil eines Wasserstoffkreislaufes wäre hochinteressant: Methan ist ein Atmosphärgas und wird derzeit in einer Menge von etwa 100 Milliarden Kubikmeter pro Jahr an entlegenen Quellen verbrannt. Das entspricht einem Heizwert von etwa 90 Millionen Tonnen Heizöl. Dazu entsteht Methan durch biologische Faulprozesse (Biogas) und ist damit aus nicht anders nutzbarer Biomasse zugänglich.



Hochauflösungsbild eines „realen“ Cu/ZnO Katalysators.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für bioorganische Chemie, Mülheim an der Ruhr
- MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam
- MPI für Plasmaphysik, Garching und Greifswald
- MPI für Polymerforschung, Mainz
- Fritz-Haber-Institut der MPG, Berlin

Drittens ist zu erwarten, dass die Energieeffizienz der Direktumwandlung von Methan zu Methanol höher ist als bei der Herstellung von Methanol über Synthesegas. Neue katalytische Routen für die Direktsynthese von Methanol würden daher in mehrfacher Hinsicht einen Beitrag zu einem nachhaltigen Energiesystem liefern.

#### Materialien mit hohem Potenzial für Wasserstoffspeicherung

Eine Alternative zur Methanol-Variante ist die direkte Bindung von Wasserstoff in einem Speicheranmaterial. Metallhydride und nanostrukturierte Materialien wie etwa Nanotubes könnten geeignete Speicheranmaterialien für diesen Zweck sein. Ergebnisse aus den vergangenen Jahren weisen darauf hin, dass Hydridspeicher durch geeignete Dotierung so modifiziert werden können, dass die Aufnahme und Abgabe des Wasserstoffs mit hoher Geschwindigkeit erfolgt. Die grundlegenden Prozesse sind aber noch weitgehend unverstanden, sodass eine Optimierung bisher im Wesentlichen empirisch erfolgt. Abgesehen von Metallhydriden gibt es eine Vielzahl weiterer Materialien mit hohem Potenzial für die Speicherung von Wasserstoff, die gerade in einer Reihe von Instituten der Max-Planck-Gesellschaft hergestellt werden.

Schließlich gibt es auch im Bereich der Brennstoffzelle, dem Herzstück einer Wasserstoff-basierten Energiewirtschaft, zahlreiche Fragestellungen, die verstärkter Grundlagenuntersuchungen bedürfen. Effiziente Anoden benötigen noch immer große Mengen an Platin, was die Brennstoffzelle sehr teuer macht. Alternative, effizientere Katalysatoren könnten auf der Basis von Legierungs-Nanopartikeln entwickelt werden, für deren Synthese es seit einigen Jah-

ren zahlreiche unterschiedliche Routen gibt. Diese Routen wurden meist aus Interesse an der Erkenntnis entwickelt, die damit erzeugten Materialien finden jetzt erste prototypische Anwendungen.

#### Neben Forschung sind Politik und Gesellschaft gefragt

Es reicht aber nicht aus, nur auf naturwissenschaftlicher Basis die Einzelkomponenten für ein zukünftiges Energiesystem zu entwickeln. Eine derartig tief greifende Umstellung in unserer komplexen Gesellschaft erfordert das reibungslose Zusammenspiel zahlreicher technischer Systeme und das Zusammenwirken der Akteure, die diese Prozesse tragen und vorantreiben. Hierdurch ergeben sich auch gesellschaftliche und politische Fragestellungen, die mit der Einführung neuer Technologien verbunden sind. Viele der angesprochenen Probleme sind derzeit noch weit von einer technischen Lösung entfernt. Außerdem sind grundlegende Untersuchungen zum Verständnis der Systeme erforderlich, bevor eine technische Umsetzung ins Auge gefasst werden kann. Diese Fragestellungen sind so komplex und langfristig, dass sie idealerweise durch eine problemgetriebene und erkenntnisorientierte Forschung angegangen werden, wie sie charakteristisch für viele Institute der Max-Planck-Gesellschaft ist. An der Nutzung dieser Erkenntnisse für die unmittelbare technische Anwendung werden dann arbeitsteilig andere Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen arbeiten. Durch die Grundlagenuntersuchungen in den angerissenen Feldern sollen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die wissenschaftlichen Voraussetzungen geschaffen werden, die unsere Energieversorgung auf eine langfristige und tragfähige Basis stellen.

Umweltmikrobiologie bedeutet Forschung an den Schnittstellen zwischen Biologie, Chemie und Geologie. Sie vertieft das Verständnis davon, wie Mikroorganismen im Wechselspiel mit Pflanze, Tier und Mensch die Biosphäre der Erde prägen und aufrechterhalten, und durch Umweltveränderungen beeinflusst werden. Mikroorganismen wie Bakterien sind in Boden und Wasser allgegenwärtig. Sie erfüllen in Stoffkreisläufen unverzichtbare Funktionen. Dabei sind sie und ihre Funktionen sehr unterschiedlich und erst teilweise verstanden. Immer wieder werden bisher unbekannte Arten, oft mit neuartigen Enzymen für neuartige Reaktionen, entdeckt. Das Methodenspektrum der Umweltmikrobiologie reicht von der Modellierung globaler Stoffkreisläufe bis zur Analyse von Genomen.

## MIKROBIOLOGIE VON UMWELTPROZESSEN

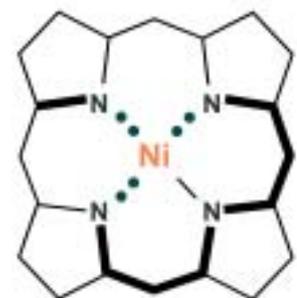
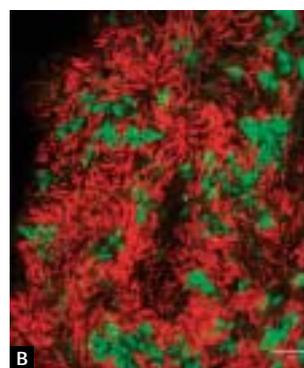
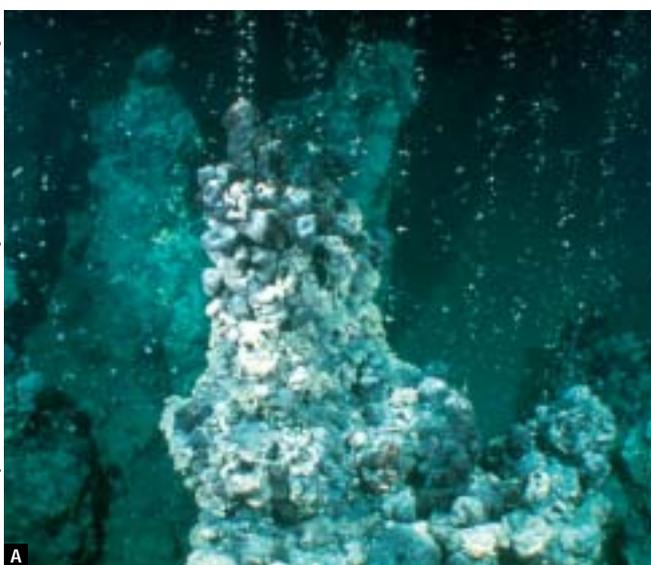
### Bakterien steuern das Leben auf der Erde

Wer einmal einen Wassertropfen aus einem Graben unter einem leistungsfähigen Lichtmikroskop inspiziert hat, war beeindruckt von den wimmelnden Mikroorganismen. Die meisten von ihnen sind Bakterien. Sie sind allgegenwärtig in Boden und Wasser. Experten schätzen, dass auf der Erde rund  $10^{30}$  Bakterienzellen leben. Deren Biomasse trägt weltweit etwa die Hälfte der Masse aller lebenden Pflanzen, Tiere und Menschen. Bleibt diese eindeutige Mehrheit im Alltag auch ungesehen, so hat sie doch enorme Auswirkungen. Sicherlich denken viele bei Bakterien zuerst an Auslöser von Infektionskrankheiten. Bei diesen handelt es sich allerdings um eine Minderheit. Die allermeisten Bakterien sind nicht nur ungefährlich, sondern

bewirken und steuern lebenserhaltende Prozesse auf der Erde.

Bakterien bauen mit Pilzen zusammen alle tote Biomasse (Lebewesen, Ausscheidungen) zu Kohlendioxid und Mineralstoffen ab. Ohne dieses Recycling käme das höhere Leben auf der Erde innerhalb weniger Jahrzehnte zum Erliegen. Bei der Abwasserklärung oder der allmählichen „Genesung“ ölverschmutzter Gebiete zeigt sich das ausgeprägte Abbaupotenzial von Bakterien auf eindruckliche Weise. In der Entwicklungsgeschichte des Lebens waren diese zellkernlosen Einzeller zuerst da, und in ihnen entwickelten sich erstmals so elementare Lebensprozesse wie Fotosynthese, Kohlendioxid-Fixierung und Atmung. In modularer

Projekt GHOSTDABS, Universität Hamburg (A,B); MPI für marine Mikrobiologie (C)



Umweltforschung vom Großen ins Kleine.

A. In 200 m Tiefe im Schwarzen Meer, wo kein Sauerstoff vorhanden ist, oxidieren Mikroorganismen austretendes Methan. Dabei lagert sich Kalk in Form knolliger Schote ab, die eine urtümliche Unterwasserlandschaft ohne höheres Leben prägen. B. Zellhaufen von *Archaeen* und Bakterien (rot bzw. grün angefärbt) aus den Schloten. C. Chemische Grundstruktur des entscheidenden Nickel-Faktors, der den biochemischen Angriff auf das Methan ermöglicht (dick: delokalisierte Elektronen).

Bauweise entstanden aus solchen und anderen Einzellern viel später die höheren Organismen. Die Chloroplasten der grünen Pflanzen und die Mitochondrien in allen tierischen und pflanzlichen Zellen sind noch heute als früher eingewanderte Bakterien zu erkennen. Bakterien fixieren den Stickstoff aus der Luft und sorgen so für natürliche Düngung. Umgekehrt oxidieren Bakterien Ammoniak aus Fäulnisprozessen zu Nitrat und überführen dieses wieder in Luftstickstoff, eine essenzielle Prozesskette für die Gesunderhaltung von Wasser und Boden. Bakterien oxidieren oder reduzieren im großen Maßstab Schwefel-, Eisen- und Manganminerale und führen je nach Umweltbedingungen über geologische Zeiträume zur Auflösung oder Ablagerung von Erzen.

#### Bakterien bergen biotechnologisches Potenzial

Viele Bakterien können ohne Sauerstoff leben. In solchen Fällen laufen statt der Atmung alternative Stoffwechselprozesse ab. Die sehr bekannte Milchsäuregärung wird seit Jahrtausenden vom Menschen genutzt. Ein ungewöhnlich anmutender, jedoch weit verbreiteter Stoffwechselprozess in sauerstoffarmen Sedimenten, Sümpfen und Faultürmen ist die Bildung von Methan. Ebenfalls bewirkt durch mikroskopisch kleine, zellkernlose Organismen, so genannte *Archaeen*, die auf den ersten Blick Bakterien gleichen, aber als „dritte Lebensform“ über viele biochemische Besonderheiten verfügen. Methan wirkt als Klimagas in der Lufthülle und trägt zur globalen Erwärmung bei, ist aber auch als Biogas nutzbar. Aber auch Methan wird wiederum von Bakterien und *Archaeen* abgebaut. Neben Methan bildet Wasserstoff für eine andere große Gruppe von Mikroorganismen den Energieträger für ihren Stoffwechsel. Die Verwendung von Wasserstoff als eine mögliche Energiequelle der Zukunft wird an vielen Stellen erforscht. So prägen die zunächst unsichtbaren und so einfach anmutenden Bakterien und *Archaeen* die globale Umweltchemie. Befähigt werden sie dazu durch eine Vielzahl besonderer Enzyme, die in höheren Organismen nicht vorkommen. Solche Enzyme sind nicht nur Themen für die Grundlagenforschung. Seit jeher interessant ist deren Nutzung in der Biotechnologie, um beispielsweise synthetisch schwer zugängliche Substanzen herzustellen oder besondere Schadstoffe abzubauen. Weil man erst wenige Prozent der natürlichen Bakterienarten kennt, bergen Bakterien im Boden und Wasser noch ein beachtliches biotechnologisches Potenzial.

#### Analyse der molekularen Mechanismen in den Zellen

In den Max-Planck-Instituten für terrestrische Mikrobiologie (Marburg) und für marine Mikrobiologie (Bremen) werden Mikroorganismen im Lebensraum Land und Meer nach dem Konzept „vom Großen ins Kleine“ erforscht.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biogeochemie, Jena
- MPI für Chemie, Mainz
- MPI für Kernphysik, Heidelberg
- MPI für marine Mikrobiologie, Bremen
- MPI für Meteorologie, Hamburg
- MPI für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau
- MPI für terrestrische Mikrobiologie, Marburg

Einerseits wird untersucht, welche bakteriellen Prozesse in großen Habitaten wie Feuchtböden, Auftriebsgebieten der Ozeane oder in der Tiefsee ablaufen und in welchem Maße dabei Kohlenstoff-, Stickstoff-, Schwefel- und Eisenverbindungen freigesetzt oder festgelegt werden. Außerdem wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler herausfinden, wie diese Prozesse durch Umweltänderungen (einschließlich der anthropogenen) verstärkt oder vermindert werden. Substanzen von besonderem Interesse sind derzeit das Klimagas Methan und der Umwelt-„Dünger“ Ammonium. Diese Forschung findet großteils im Feld oder auf See statt, daneben aber auch in Modellhabitaten wie Gewächshäusern.

Andererseits wird analysiert, welche Bakterienarten für welchen Prozess genau verantwortlich sind und welche molekularen Mechanismen dabei in den Zellen ablaufen. Für dieses Studium können viele Arten aus Boden oder Wasser isoliert und im Labor kultiviert werden, sodass man sowohl die Enzyme als auch die zu Grunde liegende Erbinformation experimentell erforschen kann. Bei den meisten Bakterien gelingt aber die Kultivierung nicht oder noch nicht. In diesen Fällen haben sich molekularbiologische Techniken, vor allem spezifische RNA- und Gen-Nachweise, als sehr erfolgreich für die Identifizierung von Mikroorganismen direkt aus Boden und Wasser erwiesen. Zu welchen Einblicken in zuvor kaum verstandene Umweltprozesse eine Verbindung der hier aufgezeigten Vorgehensweisen führt, wird an einem Beispiel aus dem Meer deutlich: Die Existenz einer von Sauerstoff unabhängigen Methanoxidation im Meeresboden, die dem Ausstoß dieses Klimagases entgegenwirkt, ist seit Jahrzehnten bekannt. Doch erst durch die Verbindung gezielter Habitaterkundung, chemischer und molekularbiologischer Analysen und das Know-how der Enzyme des Methan-Stoffwechsels war es möglich, entscheidende Prinzipien dieses Prozesses aufzuklären. Eine neue, in ihren Entfaltungs- und Anwendungsmöglichkeiten noch nicht abzusehende Entwicklung bei der Erforschung von Bakterien in der Umwelt hat sich so ergeben.

## EVOLUTION UND BIOLOGISCHE VIELFALT

Leben auf der Erde ist vor fast vier Milliarden Jahren entstanden. Es hat sich durch die komplexen Mechanismen der Evolution seither in explosionsartigen Schüben zu einer schier unendlichen Vielfalt entwickelt. Das gilt für Gene, Organismen und Ökosysteme. Die genetische Diversität ist am eindeutigsten beschreibbar: Sie wird durch Vergleich von Genomsequenzen ermittelt. Schwieriger ist die organismische Diversität zu definieren, da Organismen einer Art zwar immer nahe verwandt, aber meist genetisch nicht identisch sind. Und selbst wenn sie es sind, können sie unterschiedliche Merkmale unter unterschiedlichen Umweltbedingungen ausbilden. Dazu kommt, dass Organismen Gene verlieren, fremde Gene aufnehmen und Genomorganisationen erfahren können, ohne dadurch zu einer anderen Art zu werden. Bei der Diversität von Ökosyste-

men müssen ferner die Wechselwirkungen unterschiedlicher Organismen untereinander und mit der unbelebten Natur berücksichtigt werden. Biodiversität spiegelt die unterschiedlichen ökologischen Selektionsbedingungen in Raum und Zeit wider. Durch genetische Anpassung werden biologische Merkmale auf die jeweiligen ökologischen Bedingungen optimiert. Evolutionstheoretische Modellierungen lassen Voraussagen über die Änderungen biologischer Merkmale bei sich ändernden ökologischen Bedingungen zu. In den ersten zwei Beiträgen wird allgemein auf die Bedeutung der Biodiversitätsforschung eingegangen und diese am Beispiel von Pflanzen vertieft. Im dritten Beitrag wird die Evolution von Merkmalen durch Optimierung erklärt. Im vierten geht es um die Eigenschaften des modernen Menschen im Lichte der Evolution.

### BIODIVERSITÄTSFORSCHUNG

38



### PLASTIZITÄT UND MERKMALSVIELFALT BEI PFLANZEN

41



### EVOLUTION

44



### URSPRUNG DES MODERNEN MENSCHEN

46



MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN

Die Erforschung und darauf aufbauende Maßnahmen zum Erhalt der globalen biologischen Vielfalt (Biodiversität) gehören zu den großen und vordringlichen Zukunftsaufgaben der Wissenschaft und ihrer praktischen Nutzenanwendung. Bisher beschränkte sich die Biodiversitätsforschung weitgehend auf eine Bestandsaufnahme der Artenvielfalt bei höheren Organismen, also bei Pflanzen und Tieren. Doch werden damit weder die genetische Vielfalt innerhalb der Arten, die Vielfalt der umweltbedingten äußeren Erscheinungsformen und die komplexen Wechselwirkungen innerhalb eines Biotops, noch die Bedingungen und Mechanismen der Entstehung und fortschreitenden Evolution von Biodiversität erfasst. Grundlegend neue Erkenntnisse hierüber sind durch die rasanten Fortschritte der vergleichenden Genomforschung und der Bioinformatik möglich geworden. Auf dieser Basis sowie durch institutsübergreifende Vernetzung und die Einrichtung zusätzlicher Projekte soll die Biodiversitätsforschung weiter ausgebaut werden.

## BIODIVERSITÄTSFORSCHUNG

Von der Bestandsaufnahme zum molekularen Verständnis Biodiversität ist die Summe aller unterschiedlichen Erscheinungsformen des Lebens. Diese undifferenzierte Pauschalaussage ist jedoch wissenschaftlich äußerst unbefriedigend. Insgesamt haben fast vier Milliarden Jahre biologischer Evolution eine unübersehbar große genetische und morphologische Vielfalt hervorgebracht. Innerhalb dieser Vielfalt füllen jede Art und jedes einzelne Individuum mit speziell angepassten Interaktions- und Stoffwechsellleistungen eine spezifische ökologische Nische aus. Sie müssen diese in harter Konkurrenz verteidigen und sich stetig weiter an sie anpassen. Allein die Vielfalt der Arten ist so groß, dass nicht einmal für die Anzahl der relativ leicht identifi-

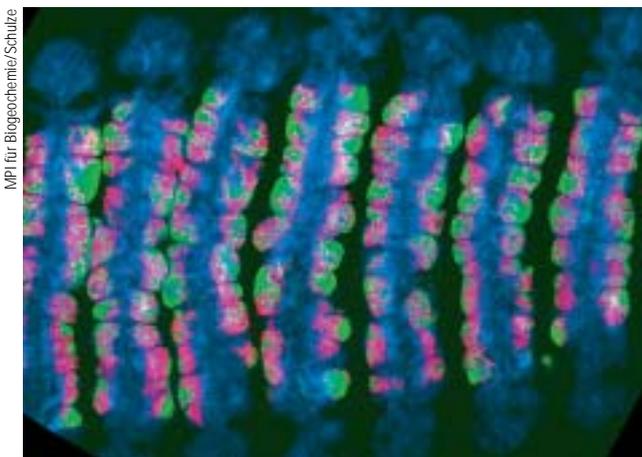
zierbaren Tier- und Pflanzenarten annähernd verlässliche Schätzungen existieren. Das Riesenreich der Mikroorganismen ist sogar noch größtenteils unerforscht.

Die bisherige Beschränkung der Biodiversitätsforschung auf die Beschreibung und systematische Erfassung makroskopisch oder mikroskopisch unterscheidbarer Arten, ihrer Standortbedingungen, Vergesellschaftungen und genetischen Eigenschaften war methodisch begründet. Bis zur Einführung molekularbiologischer Techniken gab es keinen Zugang zu den eigentlichen Schlüsselfragen nach den molekularen Mechanismen der Evolution, der Stabilität und Abgrenzung unterschiedlicher Arten sowie zu dem Phänomen der individuellen genetischen und morphologischen Vielfalt. Erst mit den heute verfügbaren Methoden lassen sich diese Fragen gezielt angehen. Unter Verwendung neuer, teilweise erst kürzlich auch in Max-Planck-Instituten entwickelter oder verbesserter Methoden sollen folgende Fragen vorrangig bearbeitet werden:

- Was ist Biodiversität?
- Wie kann Biodiversität gemessen werden?
- Wie entsteht Biodiversität?
- Wie kann Biodiversität erhalten werden?

### Was ist Biodiversität?

Biodiversität ist mehr als Artenvielfalt: Sie reicht von der individuellen Vielfalt genetischer Varianten und unterschiedlicher morphologischer Ausprägungen bis zur höchsten Stufe biologischer Komplexität, der praktisch unbegrenzten Vielfalt von Ökosystemen. Da jedoch nicht einmal



Die Muschel *Bathymodiolus puteoserpentis* enthält in ihren Kiemen (blau) zwei verschiedene Bakterienarten (rot und grün) mit deren Hilfe sie an Hydrothermalquellen von Methan und Schwefelwasserstoff leben kann.

Arten und Artgrenzen eindeutig definiert sind, ist auch eine exakte Definition des Begriffs Biodiversität bisher nicht möglich. Entsprechend sind die nächstliegenden Forschungsansätze ausgerichtet. Zunächst werden die Genome (die Gesamtheit der Gene) ausgesuchter, sowohl nahe als auch weniger nahe miteinander verwandter Arten für alle großen Organismenreiche (prokaryotische und eukaryotische Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere/Mensch) sowie eine möglichst große Zahl genetischer Varianten miteinander verglichen. Daraus folgt die exakte Beschreibung der Verwandtschaftsverhältnisse sowie der charakteristischen Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den und innerhalb der Arten auf molekularer Ebene.

Jede Art hat ein ihren Lebensbedürfnissen und Anpassungsmöglichkeiten entsprechendes Verbreitungsmuster. Das Spektrum reicht von extremer Anpassung an einen einzigen, lokal eng begrenzten Lebensraum – etwa in völliger Isolierung lebende Höhlentiere – bis zu global weit verzweigtem Vorkommen auf allen Kontinenten und in sehr unterschiedlichen Habitaten. Zu diesen weithin bekannten, so genannten Kosmopoliten gehören beispielsweise viele Bakterien, der Löwenzahn oder die Stubenfliege. Je weiter die Verbreitung und je diversifizierter die Ökosysteme, in denen eine Art vorkommt, desto aufwendiger und von internationaler Zusammenarbeit abhängiger ist die vergleichende Analyse der verschiedenen „Ökotypen“ – einschließlich der jeweiligen genetischen Diversität und der zugehörigen Umweltbedingungen. Gerade derart umfassende, auf möglichst weitgehende Vollständigkeit abzielende Untersuchungen sind jedoch eine unerlässliche Voraussetzung, um Biodiversität wissenschaftlich exakt zu beschreiben, zu verstehen und Grundlagen für deren Schutz zu erarbeiten.

Ein weiterer Teilaspekt, die Plastizität der Ausprägung genetisch bedingter Merkmale, ist ein besonders an Pflanzen häufig zu beobachtendes Phänomen: etwa ein buschiger, kurzer Wuchs in starkem Sonnenlicht und ein schlanker, hoher Wuchs bei dichter Beschattung. Das Phänomen der genomischen und morphologischen Plastizität ist wissenschaftlich und praktisch bedeutsam und wird im Kapitel „Plastizität und Merkmalsvielfalt bei Pflanzen“ vertieft.

#### Wie kann Biodiversität gemessen werden?

Eine eindeutige Bestimmung der genetischen Identität eines Individuums erfolgt durch die DNA-Analyse. Inzwischen stehen zur vergleichenden Analyse großer Individuenzahlen höchst effiziente, automatisierte Verfahren zur Verfügung.

Da der Idealfall eines Vergleichs sämtlicher Arten oder gar aller Individuen eines Biotops praktisch nur in Sonderfällen zu verwirklichen ist, muss in der Regel eine möglichst repräsentative Auswahl getroffen werden. Dabei genügen winzige Zell- oder Gewebeprobe, sodass alle Individuen nahezu unversehrt erhalten und für weitere Untersuchungen verfügbar bleiben, zum Beispiel für die Analyse ökologisch relevanter Inhaltsstoffe und ihrer wechselseitig beeinflussten Umsetzungsraten.

Sobald derartige Analysen zu einem entsprechenden Kenntnisstand geführt haben, sollte es möglich sein, geeignete Markersequenzen zur eindeutigen Identifizierung aller Arten und Artvarianten innerhalb komplexer Mischpopulationen festzulegen. Auch wenn dieser Weg zur vollständigen Erfassung aller Individuen eines Biotops heute noch als fernes oder gar utopisches Ziel erscheinen mag, so handelt es sich doch lediglich um die konsequente Fortführung der bereits zur Routine gewordenen Genomanalyse ganzer Organismen und des gezielten Vergleichs ausgewählter DNA-Abschnitte, etwa von Mensch und Schimpanse. Aber es geht auch um die Bestimmung des „Metagenoms“, also der gesamten in einem Habitat enthaltenen Erbinformation. Im gegenwärtigen Stadium sind derartige Analysen allerdings zunächst noch auf relativ artenarme Biotope wie Seewasserproben beschränkt.

#### Wie entsteht Biodiversität?

Trotz des rasanten Fortschritts, mit dem unser Verständnis von Evolution und Vererbung seit Darwin und Mendel immer klarere Konturen annimmt, sind unsere Kenntnisse über die molekularen Details und das komplexe Wechsel-



Biodiversitätsversuchsfelder mit Gräsern und Kräutern in der Saaleaue bei Jena.

## BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biogeochemie, Jena
- MPI für chemische Ökologie, Jena
- MPI für Entwicklungsbiologie, Tübingen
- MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
- MPI für Limnologie, Plön
- MPI für marine Mikrobiologie, Bremen
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam
- MPI für Ornithologie, Seewiesen
- MPI für terrestrische Mikrobiologie, Marburg
- MPI für Züchtungsforschung, Köln

spiel zwischen genetischem Potenzial und ökologischen Rahmenbedingungen noch äußerst mangelhaft. Grundsätzlich entsteht Biodiversität durch das Zusammenwirken von Zufallsmutationen und gerichteter Selektion der im jeweiligen Umfeld erfolgreichsten Varianten. Wie dies im Einzelnen geschieht, ist eine der Kernfragen der Biologie. Sie umfasst alle Teile des komplexen, dynamischen Zusammenspiels von Mikroevolution (das Ergebnis der genetischen Variabilität) und Makroevolution (Bildung neuer Organe oder Umbildung von Gliedmaßen) mit der Gesamtheit aller Umweltbedingungen (Klima, Boden- und Geländebeschaffenheit sowie zahllose vor- und nachteilige Wechselwirkungen mit den übrigen Organismen eines Biotops).

Beeindruckende Beispiele für extrem positive oder negative Wechselwirkungen sind die Interaktionen vieler Pflanzen und Pilze. Positive Wechselwirkungen können als enge Symbiose im pflanzlichen Wurzelbereich (Mykorrhiza) durch intensiven Stoffaustausch sogar für beide Partner lebenswichtig sein. Im negativen Fall sind Pilze entweder todbringende Krankheitserreger oder sie selbst werden durch heftige Abwehrreaktionen der befallenen Pflanzen abgetötet. Häufig sind natürliche, artenreiche Ökosysteme vorerst allerdings noch zu komplex für wissenschaftlich aussagekräftige Untersuchungen, so dass Versuchsfelder mit definierter Diversität angelegt werden müssen. Entsprechend umfangreich und langfristig angelegt ist die Biodiversitätsforschung.

**Wie kann Biodiversität erhalten werden?**

Biodiversität ist eine Grundvoraussetzung für die dynamische Entwicklung und nachhaltige Stabilität von Ökosystemen. Der Erhalt eines umfassenden, langfristig tragfähigen Gesamtsystems Erde – und damit auch der Lebensgrundlage des Menschen – wird letztlich von rechtzeitigen und wirkungsvollen Entscheidungen auf politischer Ebene abhängen. Je fundierter der wissenschaftliche Kenntnisstand und je mehr dieser das öffentliche Bewusstsein sowie die politischen Entscheidungen prägt, um so größer sind die Aussichten, einen globalen ökologischen Kollaps aufgrund der immer rascher fortschreitenden Verluste an Biodiversität zu vermeiden.

In zahlreichen Max-Planck-Instituten werden derzeit die methodischen und theoretischen Grundlagen sowie erste konkrete Fragestellungen der Biodiversitätsforschung bearbeitet. Durch gezielte Erweiterung, logistische Vernetzung und internationale Zusammenarbeit besteht die Möglichkeit der Bildung eines effektiven, sektionsübergreifenden Schwerpunktthemas.



Pflanzen dienen dem Menschen als Hauptnahrungsquelle, produzieren wertvolle Rohstoffe und sind unverzichtbarer Bestandteil des Ökosystems Erde. Seit kurzem verfügen wir über einen vollständigen Katalog der Gene je einer Wild- und einer Kulturpflanze (*Arabidopsis* und Reis). Eine wesentliche Herausforderung ist es, die innere Logik des geordneten Zusammenspiels von Genprodukten in der Zelle und zwischen Zellen bei der Ausprägung komplexer Merkmale zu entschlüsseln (beispielsweise Pflanzenarchitektur, Krankheitsresistenz oder Ertrag). Dazu müssen wir verstehen, wie aus dem Zusammenwirken einer Vielzahl von Molekülen regulatorische Netzwerke mit Systemeigenschaften entstehen. Es wird erwartet, dass das Verständnis dieser regulatorischen Prinzipien hilft, die Entstehung natürlicher Merkmalsvielfalt nachzuvollziehen, die ein Charakteristikum von Ökosystemen darstellt. Genetisch determinierte Merkmalsvielfalt ist der Rohstoff der Pflanzenzüchtung. Das Verständnis von Gesetzmäßigkeiten der plastischen Merkmalsausprägung wird im nächsten Jahrzehnt eine radikale Veränderung der Pflanzenzüchtung einleiten. Mit ihr wird es dem Menschen erstmals möglich sein, selbst komplexe Merkmale gezielt und nach seinen Bedürfnissen zu beeinflussen.

## PLASTIZITÄT UND MERKMALSVIELFALT BEI PFLANZEN

### Neuartige Merkmale

Im vergangenen Jahrzehnt hat die Pflanzenbiologie eine Revolution erlebt. Die ersten beiden vollständig sequenzierten Pflanzengenome geben erste Einblicke in die rund 30 000 Gene, die als Blaupausen pflanzlichen Lebens dienen. Die vollständig entschlüsselten Genome der Modellpflanze *Arabidopsis* (Ackerschmalwand, *Arabidopsis thaliana*) und der ökonomisch bedeutsamen Nutzpflanze Reis ermöglichen einen Vergleich der molekularen Baupläne von zwei Samenpflanzen, die evolutionär entfernte Verwandte sind. Für nahezu die Hälfte aller *Arabidopsis*-Gene konnten durch begleitende genetische und biochemische Analysen bereits vorläufige biologische Funktionen bestimmt werden. Darüber hinaus wurden erste molekulare Modelle von fun-

damentalen Merkmalen pflanzlichen Lebens abgeleitet, wie etwa der pflanzlichen Krankheitsresistenz, der Blütenentwicklung, des Blühzeitpunktes, der Embryogenese, der Fotosynthese und der Wirkung von Wachstumsregulatoren. Im kommenden Jahrzehnt soll die ganze Vielschichtigkeit solcher molekularen Prozesse entschlüsselt werden. Bisher können diese nicht virtuell simuliert werden und es ist unklar, wie die Natur regulatorische Schaltkreise modifiziert, um Plastizität von Merkmalen innerhalb einer Art und zwischen Arten zu erzeugen. Beispielsweise findet sich bei Pflanzenfrüchten selbst innerhalb einer Art eine nahezu unbegrenzte Anzahl von Form- und Größenvarianten (siehe Abb.). Experten gehen davon aus, dass in zehn Jahren erstmals Vorhersagen gemacht werden können, wie Pflanzenmerkmale gezielt verändert oder einer Pflanze neuartige Merkmale hinzugefügt werden können.

MPI für Züchtungsforschung/Schulze-Lefert



Die Formen- und Größenvielfalt bei der Aubergine ist groß.

### Regulatorische Mechanismen grundlegender Pflanzenmerkmale

Unser derzeitiges Wissen über regulatorische Mechanismen von Pflanzenmerkmalen gleicht noch in vielen Fällen einer losen Sammlung von Mosaiksteinen, die von einer Reihe einzelner Gene repräsentiert werden. Deren genaue Verknüpfungen sind derzeit nur in Ansätzen bekannt. Ein tiefes Verständnis der regulatorischen Mechanismen erfordert die Identifizierung aller Gene, die in molekularen Netzwerken jedem Merkmal zu Grunde liegen. Unabdingbar ist die genaue Kenntnis der Kommunikation der von den Genen kodierten Proteine in Zeit und Raum und die Entschlüsselung der inneren Logik solcher regulatorischen Netzwerke. Dies wird auch künftig eine Fokussierung auf pflanzliche Modellsysteme wie *Arabidopsis* unabdingbar

machen. Denn für diese Pflanze ist bereits eine breite Palette molekularer Werkzeuge vorhanden oder in der Entwicklung. Zumindest für diese Pflanze sollte es in den nächsten zehn Jahren gelingen, umfassende molekulare Netzwerke von Merkmalen wie beispielsweise der Kontrolle des Blühzeitpunktes, der Pflanzenarchitektur und der pflanzlichen Krankheitsresistenz zu beschreiben, um anschließend die durch Netzwerkstrukturen bedingten Systemeigenschaften abzuleiten.

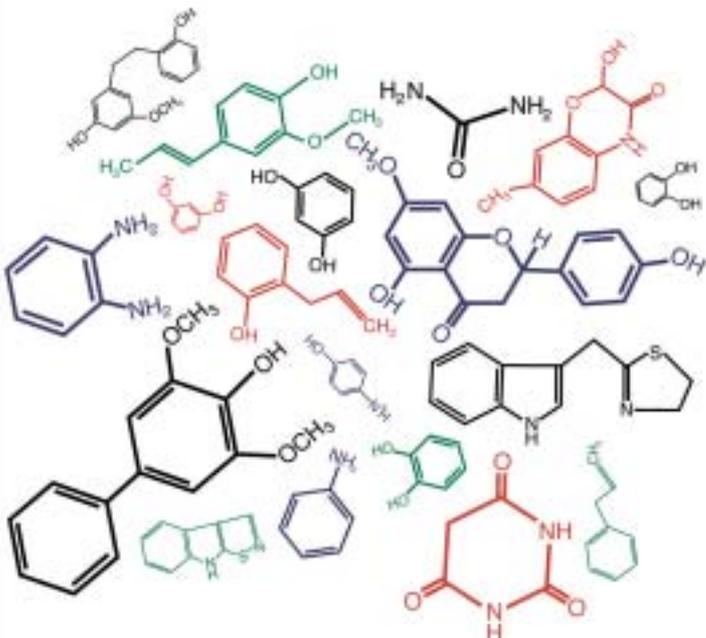
Die Identifizierung aller Gene, die an der Ausprägung eines Merkmals beteiligt sind, wird durch neuere Technologien wie die globale Genexpressionsanalyse beschleunigt. Bereits in naher Zukunft wird es einen Atlas der Expression aller pflanzlichen Gene geben, in dem räumliche und zeitliche Expressionsmuster, ihre wechselseitige Abhängigkeit und ihre Beeinflussung durch Umweltfaktoren erfasst sind. Dennoch bedarf es der Entwicklung einer Reihe innovativer Technologien, um pflanzliche Netzwerkstrukturen zu entschlüsseln. Dazu gehört auch die chemische Genetik, mit der Funktionszuordnungen für Proteine durchgeführt werden können, die sich bisher einer Analyse mit traditionellen genetischen Verfahren entzogen haben. In einem

ersten Schritt wird dabei nach kleinen Molekülen gesucht, die pflanzliche Signalwege in Abwesenheit eines natürlichen Signals unterbrechen oder aktivieren können. Durch neuere Methoden der chemischen Synthese lassen sich kleine Moleküle in nahezu unbegrenzter Strukturvielfalt erzeugen und in Form chemischer Bibliotheken für eine solche Wirkstoffsuche einsetzen. Die Verknüpfung genetischer und chemischer Technologien erlaubt anschließend einen raschen Zugriff auf die zellulären Wirkungsorte kleiner Moleküle, die in der Regel pflanzliche Proteine sind.

Obwohl die Molekulargenetik in der Vergangenheit die Rolle eines Taktgebers bei der Entschlüsselung pflanzlicher Prozesse gespielt hat, bedarf es künftig Methoden, die auf Proteinebene dynamische molekulare Prozesse in räumlicher und zeitlicher Auflösung in lebenden Zellen erfassen. Die Entwicklung quantitativer und nichtinvasiver bildgebender Verfahren hat in diesem Sinne die Aufgabe, bislang verborgene regulatorische Information aufzudecken, die auf der Ebene von Proteinen und Proteinkomplexen wirksam werden.

#### Natürliche genetische Diversität und die Entstehung biologischer Vielfalt

Die Entstehung und Aufrechterhaltung der pflanzlichen Vielfalt, sowohl innerhalb einer Art als auch zwischen Arten, ist faszinierend und ihr Verständnis auf molekularer Ebene eine der großen Herausforderungen zukünftiger Forschung. Die Analyse der Mechanismen natürlicher genetischer Diversität hilft zu verstehen, wie die mit Modellpflanzen im Labor erarbeiteten regulatorischen Prinzipien eines Merkmals in der Evolution modifiziert wurden, um Merkmalsvarianten zu erzeugen. Dadurch sollte sichtbar werden, welche Komponenten eines regulatorischen Netzwerkes modifiziert werden können, ohne die Überlebensfähigkeit der Pflanze in ihrer Wechselwirkung mit der Umwelt zu beeinträchtigen. Merkmalsvielfalt kann theoretisch durch Aktivitätsänderungen einzelner oder mehrerer Komponenten eines Netzwerkes, etwa durch zeitliche oder räumliche Änderungen der Protein- und Genexpression, durch das Hinzufügen oder Weglassen von Komponenten oder durch Änderungen von Verknüpfungen der Komponenten erzeugt werden. Innerhalb einer Art sind der phänotypischen Variabilität Grenzen gesetzt. Daher kann die Pflanzenbiologie in der Zukunft durch besonnene Auswahl weniger weiterer Modellpflanzen lernen, wie in anderen Arten die Grenzen der Merkmalsvielfalt verschoben wurden und wie Neuentwicklungen in der Evolution entstanden.



Eine Vielfalt kleiner Moleküle bildet das Ausgangsmaterial, mit dem sich gezielt Signalwege in der Zelle unterbrechen oder aktivieren lassen.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für chemische Ökologie, Jena
- MPI für Entwicklungsbiologie, Tübingen
- MPI für Limnologie, Plön
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam
- MPI für Züchtungsforschung, Köln

Die intensive Analyse der natürlichen genetischen Variabilität wird in *Arabidopsis* durchgeführt, für die bereits hunderte Ökotypen aus nahezu allen Längen- und Breitengraden der Erde gesammelt wurden. Die Herstellung einer Vielzahl von rekombinanten Inzuchtlinien aus Kreuzungen zwischen Ökotypen erlaubt einen Zugriff auf Gene, die für die natürliche Merkmalsvielfalt verantwortlich sind. Diese Gene können dann in das regulatorische Netzwerk integriert werden, das parallel mit Laborstämmen für ein jeweiliges Merkmal erarbeitet wird. Darüber hinaus sollten Gene eingefügt und Mechanismen analysiert werden, die in anderen Arten die Plastizität desselben Merkmals erweitern. Als Beispiel könnte das Merkmal Mehrjährigkeit in bestimmten Pflanzenarten dienen, das vermutlich eine Variante des regulatorischen Netzwerkes Blühzeitpunkt in einjährigen Pflanzenarten ist.

Die Analyse solcher Darwinscher Diversität wird die universelle Anwendbarkeit regulatorischer Netzwerke von pflanzenspezifischen Merkmalen auf die Probe stellen. Vor allem aber wird sie Wege aufzeichnen, wie die Topologie eines Netzwerkes verändert werden muss, um Neuerungen oder extreme Varianten eines Merkmals zu erzeugen. Damit begibt sich die Pflanzenbiologie im nächsten Jahrzehnt auf den Pfad der mathematischen Modellierung und Simulation regulatorischer Netzwerke. Dadurch sollen theoretische Vorhersagen durchgeführt werden, um genetische Veränderungen aufzuzeigen, die für wünschenswerte Merkmalsänderungen notwendig sind.

#### Rationale Pflanzenzüchtung

Die Züchtung von Nutzpflanzen beruht seit etwa 10 000 Jahren auf der zufälligen Mischung und Selektion genetischer Varianten einer Art. Die Kenntnis der Prinzipien regulatorischer Netzwerkänderungen, mit denen wünschenswerte Merkmalsänderungen erzeugt werden können, wird erstmals eine ausreichende Informationsqualität für die rationale Pflanzenzüchtung liefern. Beispielsweise könnten gezielte Veränderungen des Erbguts auf solche Komponenten eines regulatorischen Netzwerkes konzentriert werden, die für die Plastizität eines Merkmals in natürlichen Populationen verantwortlich sind. Es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung auch Prinzipien der Domestikation von Pflanzen erkennen lässt, die bereits in der Vergangenheit zu einem dramatischen Umbau von Form und Funktion im Vergleich zu Wildformen führte. Das Wissen über die Plastizität von Merkmalen wird die heutigen Grenzen der Pflanzenzüchtung aufheben. So können in einer Nutzpflanze Merkmale erzeugt und kombiniert werden, die getrennt in entfernt verwandten Arten vorkommen. Es ist aber auch denkbar, die bisher erstaunlich geringe Zahl von Nutzpflanzen zu erweitern. So ließe sich durch rationale Domestikation ungenutztes Potenzial von Wildpflanzen für die menschliche Ernährung, für neuartige Rohstoffe und für eine vielfältige Kulturlandschaft erschließen.

Durch die von Charles Darwin erkannte Mechanik der Evolution sind bei allen Lebewesen Merkmale entstanden, die für bestimmte Aufgaben optimiert sind. Sind die ökologischen Selektionsbedingungen bekannt, können das erwartete Optimum berechnet und auf dieser Grundlage experimentell überprüfbar. Voraussagen etwa über physiologische Mechanismen gemacht werden. Damit wird eine effizientere Erforschung von Mechanismen erreicht. Umgekehrt kann für jedes biologische Merkmal berechnet werden, unter welchen ökologischen Bedingungen es das Optimum darstellt. Das erlaubt vorauszusagen, ob ein beobachtetes Merkmal stabil bleibt oder sich beispielsweise klimabedingt im evolutionären Umbruch befindet. Um stabil zu bleiben, erfordern viele weit verbreitete Merkmale wie die sexuelle Fortpflanzung Randbedingungen, die ohne evolutionstheoretische Modellierung nicht erkannt worden wären.

## EVOLUTION

### Optimierung durch Selektion

Gehirne, Sinnesorgane, Vogel- und Insektenflügel oder Körperoberflächen sind noch unerreichte Vorbilder für menschliche Ingenieurskunst. Wie konnte die Natur solche perfekten Lösungen zustande bringen? Charles Darwin schaffte die Grundlage für die heute akzeptierte Erklärung für die Evolution optimierter Eigenschaften: Die Individuen, die besser unter den herrschenden ökologischen Bedingungen überleben, haben mehr konkurrenzfähige Nachkommen, die die günstigen Eigenschaften ihrer Eltern erben. Jede neue Generation besteht vorwiegend aus den Nachkommen der erfolgreicherer Eltern. Merkmale werden so ständig weiter entwickelt und können nach vielen Generationen optimiert sein. Alles scheint erreichbar: Wenn Bildsehen erforderlich ist, wird unabhängig vom Ausgangsmaterial ein Kamerauge evolviert. So ist etwa beim Menschen das Auge aus dem Zwischenhirn und das beim Tintenfisch aus der Haut entstanden. Beide Augen sind technisch gleich perfekt.

Wenn das Optimum erreicht ist, hält die Selektion es stabil. Das erweckt den irigen Eindruck, dass Evolution ein sehr langsamer Prozess ist. Ein neues komplexes Design kann jedoch schnell evolviert werden, wenn die Selektion plötzlich in eine neue Richtung „drückt“: Das nutzt der Mensch für die Züchtung aus. So sind Blumenkohl, Rosenkohl, Kohlrabi oder Grünkohl durch zielgerichtete menschliche Selektion nach Darwins Prinzip aus einer unscheinbaren Wildkohlpflanze in historischer Zeit hervorgegangen. Auch ohne menschliche Absicht kann sich die stabilisierende Selektion plötzlich in gerichtete Selektion verändern. Zum Beispiel hat die Klimaerwärmung der vergangenen Jahrzehnte einen

kleinen Vogel aus Süddeutschland, die Mönchsgrasmücke, eine neue Zugrichtung und damit ein neues Winterquartier evolviert lassen. Die Vögel überwintern jetzt genetisch programmiert in England statt in Spanien.

Es ist zu erwarten, dass alle komplexen Merkmale von Lebewesen optimiert sind und durch spezifische ökologische Bedingungen stabil gehalten werden. Wenn diese durch Erfindungen unserer Zivilisation verändert oder entfernt werden, wirkt sofort eine gerichtete Selektion weg vom letzten Optimum. Die Erfindung von Brillengläsern bewirkte zwar nur eine Abschwächung der stabilisierenden Selektion, dies hat jedoch zu zunehmender Fehlsichtigkeit geführt.

### Evolutionstheoretische Modelle

Viele biologische Phänomene sind heute mechanistisch bis hinunter auf molekulares Niveau gut verstanden. Das sagt jedoch nichts darüber aus, für welche Aufgabe ein Merkmal evolviert wurde. Zum Verständnis des Optimums eines Merkmals werden Kenntnisse des Zwecks und der herrschenden ökologischen Bedingungen benötigt. Frei nach Dobzhansky: Ein Merkmal ist nur sinnvoll, wenn man es im Lichte der Evolution betrachtet.

Jede biologische Forschungsrichtung könnte vom evolutionsbiologischen Instrumentarium profitieren. Mit evolutionstheoretischen Modellen kann man voraussagen, unter welchen ökologischen Bedingungen das untersuchte komplexe Merkmal im Optimum ist oder welches komplexe Merkmal (Immunsystem, Zellsignalweg, Sozialsystem) man im Optimum erwartet, wenn die ökologischen Anforderun-

gen bekannt sind. Die Evolutionstheorie hilft, gezielt und effizient nach dem (höchst wahrscheinlich) evolvierten Mechanismus zu suchen.

### Das Paradox der sexuellen Fortpflanzung

Wie müssen davon ausgehen, dass alle biologischen Merkmale auf die jeweils vorherrschenden Bedingungen nahezu optimiert sind. Sobald es aber um das Verständnis geht, unter welchen Bedingungen ein beobachtetes Merkmal das Optimum darstellt, tauchen häufig unerwartete Probleme auf. Es ist beispielsweise nicht klar, warum sich die meisten Tier- und Pflanzenarten sexuell fortpflanzen. Insbesondere können wir nicht erklären, wozu es das männliche Geschlecht gibt. Da Männchen weder Eier legen noch Kinder gebären, tragen sie nicht materiell zur nächsten Generation bei. Ein asexuelles Weibchen, das nur identische Kopien – also Töchter – von sich selbst produziert, hat dadurch doppelt so viele Enkel wie ein sexuelles Weibchen (siehe Abb. unten). Sexuelle Fortpflanzung ist nur halb so effizient wie asexuelle Fortpflanzung. Da sie aber weit verbreitet ist, sollte sie optimal sein. Nur warum? Um den doppelten Effizienznachteil mehr als auszugleichen, muss das Weibchen ein Männchen auswählen, dessen Gene zusammen mit ihren Genen einen mindestens doppelten Qualitätsvorteil der Nachkommen gegenüber asexuell erzeugten erlauben. Das ist aber nur möglich, wenn die folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind: 1. Die selektierende Ökologie verändert sich ständig dramatisch von Generation zu Generation (von Regenwald zu Wüste, wenn das Klima verantwortlich wäre); 2. es gibt eine ungewöhnlich große genetische Vielfalt für die maßgeblichen Gene in der Population; 3. jedes Weibchen kann diese Gene an potenziellen Partnern von

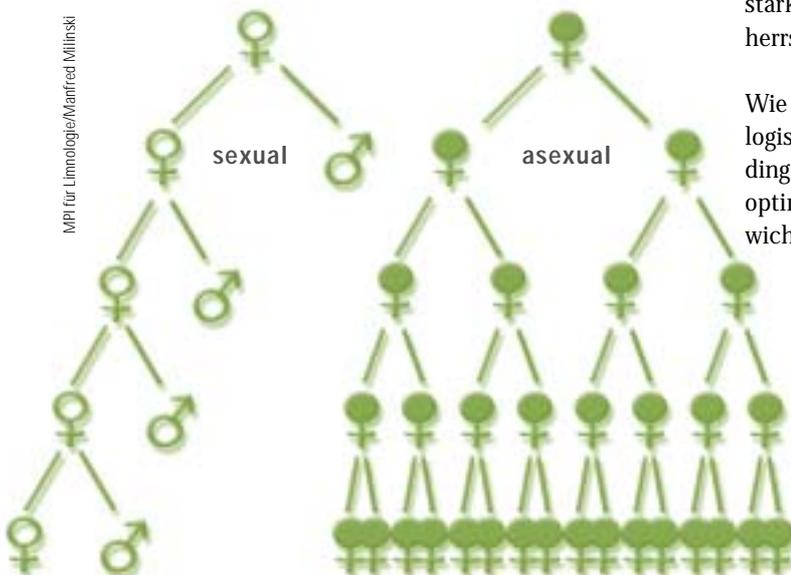
### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Chemische Ökologie, Jena
- MPI für Entwicklungsbiologie, Tübingen
- MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
- MPI für Immunbiologie, Freiburg
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Limnologie, Plön
- MPI für Ornithologie, Seewiesen

außen erkennen und weiß, welche Gene sie selbst hat, um die beste Ergänzung zu wählen. Obwohl kaum vorstellbar, ist dies alles zwingend notwendig, um die Existenz der sexuellen Fortpflanzung zu verstehen.

Der Oxforder Evolutionstheoretiker W. D. Hamilton hatte die Idee, dass sich schnell verändernde Krankheitserreger den Selektionsdruck ausüben, der Weibchen immer wieder andere Resistenzgene von Männchen „einkaufen“ lässt. Gerade bei diesen Immungenen gibt es eine enorme Vielfalt in allen bisher untersuchten Wirbeltierpopulationen – ein weiteres ungelöstes Problem der Evolutionsbiologie. Zwei beliebige Menschen haben ganz unterschiedliche Immungene, was zu den bekannten Problemen bei Organtransplantationen führt. Menschen, Mäuse und Sticlunge können die Immungene von potenziellen Partnern riechen. Sticlingsweibchen riechen ihren Partner so aus, dass die Nachkommen die optimale Resistenz gegen die gerade vorherrschenden Parasiten haben. Wenn es der Medizin gelingen sollte, alle Infektionskrankheiten vollständig zu verhindern, würde vermutlich auch beim Menschen eine starke gerichtete Selektion auf asexuelle Fortpflanzung herrschen. Aber davon sind wir noch weit entfernt.

Wie für die sexuelle Fortpflanzung kann man für jedes biologische Phänomen die Frage stellen: Unter welchen Bedingungen ist dieses Merkmal, so wie man es vorfindet, die optimale Lösung? Wohin wird es sich entwickeln, wenn wichtige Bedingungen sich verändern?



Da Söhne nicht materiell zur nächsten Generation beitragen, ist die sexuelle Fortpflanzung der asexuellen an Effizienz hoffnungslos unterlegen. Trotzdem pflanzen sich fast alle Tiere und Pflanzen sexuell fort.

Der Mensch beeinflusst das Leben auf der Erde mehr als andere Arten und ist gleichzeitig die einzige Art, die über ihre eigene Geschichte und Zukunft aktiv reflektiert. Die Sequenzierung des menschlichen Genoms und der Genome anderer Arten eröffnet neue Möglichkeiten, die biologischen Hintergründe der einzigartigen Eigenschaften des Menschen zu erkunden. Dies setzt einen tief greifenden interdisziplinären Ansatz voraus, der die geschichtlichen, kognitiven und kulturellen Voraussetzungen der Menschwerdung auf empirische Weise aufklärt. Die Max-Planck-Gesellschaft ist als fachübergreifende Forschungsorganisation ideal positioniert, eine führende Rolle in dieser Arbeit zu übernehmen. In interdisziplinären und vergleichenden Forschungsprojekten sollen in den nächsten Jahren die biologischen und kulturellen Voraussetzungen für die einzigartige Rolle des modernen Menschen auf unserem Planeten untersucht werden.

## URSPRUNG DES MODERNEN MENSCHEN

### Unterschiede zwischen Mensch und Tier

Der Ursprung des Menschen kann als ein Puzzle aus unterschiedlichen Ursprüngen gesehen werden. Es kann nach dem Ursprung des menschlichen Gehirns, nach dem Ursprung der kognitiven Fähigkeiten des Menschen, nach dem Ursprung der menschlichen Sprache oder nach dem Ursprung der kulturellen Fähigkeiten des Menschen gefragt werden. Diese unterschiedlichen Ursprünge von Merkmalen des modernen Menschen müssen nicht gleichzeitig existiert haben und bestehen oft aus mehreren, voneinan-

der getrennten Schritten. Um zu einem mehr oder weniger vollständigen Verständnis all dieser Aspekte der Menschwerdung zu kommen, sind mehrere wissenschaftliche Disziplinen gefragt. So beinhaltet fast jeder dieser Aspekte sowohl eine genetische oder biologische Komponente als auch die Notwendigkeit, menschliche Eigenschaften zu definieren und tiefgreifend zu verstehen. Letzteres erfordert unter anderem paläontologische Untersuchungen, linguistische Studien und vergleichende Untersuchungen an Menschen und unseren nächsten Verwandten, den Menschenaffen. Es geht darum, sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede zwischen Menschen und anderen Arten zu definieren. Die Max-Planck-Gesellschaft will in den nächsten Jahren einige fundamentale Aspekte der Menschwerdung durch interdisziplinäre Untersuchungen aufklären. Dabei werden verschiedene Max-Planck-Institute mit anderen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland zusammenarbeiten. Einige dieser Projekte können wie folgt beschrieben werden.

### Ursprung des menschlichen Gehirns

Das Gehirn des Menschen unterscheidet sich von den Gehirnen anderer Arten durch seine Größe und seine zelluläre Organisation. Ein großer Teil des Wachstums des menschlichen Gehirns findet nach der Geburt statt. Mittels Computertomografie und innovativer Bildbearbeitungsmethoden werden am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig fossile Funde untersucht und deren innere Strukturen sichtbar gemacht. So können fossile Schädel aus Bruchstücken rekonstruiert und für Computersimulationen, die Aufschluss über das Wachstum des Gehirns geben, zugänglich gemacht werden. Zum Beispiel ist bestimmbar, ob die Beschleunigung des Gehirnwachs-



Einen Schlüssel zu neuen Erkenntnissen über den Ursprung des Menschen liefern die uns nahe verwandten Menschenaffen. Um Ähnlichkeiten und auch Unterschiede zwischen Menschen und Menschenaffen genauer zu definieren, sind Blicke auf den Stammbaum des Menschen und der Menschenaffen aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen heraus notwendig.

MPI für evolutionäre Anthropologie/Knut Finstermeier



tums bei menschlichen Kindern auch schon bei Neandertalern, beim *Homo erectus* oder anderen frühen Menschenformen vorhanden war. Parallel dazu werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik in Dresden Mechanismen des Wachstums der Gehirnrinde zellbiologisch aufklären und zusammen mit Forscherinnen und Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie die Evolution der beteiligten Gene untersuchen. Die Entwicklung der Großhirnrinde wird auch am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt einen Forschungsschwerpunkt bilden. Das Fernziel dieser Arbeiten ist die Aufklärung der Evolution der genetischen und zellulären Mechanismen, die für die Entstehung des menschlichen Gehirns verantwortlich sind.

#### Ursprung der menschlichen Kognition und Kultur

Obwohl sich der Mensch auf der kognitiven Ebene deutlich von den Menschenaffen unterscheidet, ist nicht klar, wie diese Unterschiede zu definieren sind und wann sie während der kindlichen Entwicklung entstehen. Welche kognitiven Fähigkeiten Tiere, insbesondere Menschenaffen, mit den Menschen gemeinsam haben und wo Unterschiede bestehen, wird im Wolfgang-Köhler-Zentrum für Primatenforschung untersucht. Dabei handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie und der Zoo Leipzig GmbH. Insbesondere vergleichende Untersuchungen bei Kindern von Menschen und Menschenaffen sollen Aufschluss darüber geben, wann während der Entwicklung des Kindes welche Unterschiede auftreten. Die Zusammenarbeit mit Forscherinnen und Forschern, die spezifisch menschliche Krankheiten wie Autismus oder Schizophrenie untersuchen, wird dabei hilfreich sein.

Ein Nachteil von Untersuchungen an in menschlicher Obhut lebenden Menschenaffen besteht darin, dass die Tiere nicht alle ihre natürlichen Fähigkeiten und Verhaltensweisen entwickeln können. Deshalb werden Langzeitstudien mit Menschenaffen-Gruppen in ihren natürlichen Habitaten in Afrika durchgeführt. Dabei geht es um Fragen hinsichtlich der Sozialstrukturen innerhalb einer Gruppe, Beziehungen zwischen verschiedenen Gruppen, Fortpflanzungsgewohnheiten sowie Kulturen und Traditionen bei den Menschenaffen. Eine Beantwortung dieser Fragen wird Aufschlüsse über die Evolution der menschlichen Kultur und des menschlichen Zusammenlebens geben.

#### Ursprung der menschlichen Sprache

Die Fähigkeit zur komplexen Sprache unterscheidet die Menschen von anderen Tieren. Es steht aber fest, dass auch Menschenaffen eine Fähigkeit zur sprachlichen Kom-

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden
- MPI für Psycholinguistik, Nijmegen

munikation besitzen. Am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig wird die Sprachentwicklung bei Kindern mit neurophysiologischen und bildgebenden Methoden und am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin die Plastizität des Gehirns bei Lernprozessen untersucht. Parallel dazu werden am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen und am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig vergleichende Untersuchungen zu Sprachen und Spracherwerb in der ganzen Welt durchgeführt. Solche Untersuchungen können die Grundstruktur eines möglichen Vorfahren aller menschlichen Sprachen aufklären. Auf lange Sicht möchten wir die neurologischen Grundlagen der Sprache und des Spracherwerbs verstehen und die verwandten kognitiven Prozesse beim Affen untersuchen – etwa durch nichtinvasive bildgebende Verfahren, die am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen entwickelt werden. In Zusammenhang mit diesen Untersuchungen werden auch sekundäre Adaptationen, die die Sprache betreffen, wie die verbesserte motorische Kontrolle der Stimmbänder und anderer Sprachorgane, untersucht werden.

#### Vergleichende Genomforschung

Ein verbindendes Glied zwischen allen diesen Forschungsansätzen wird die evolutionäre und funktionelle Analyse der Genome von Menschen und Menschenaffen darstellen. Die Zielsetzung am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie besteht darin, alle wichtigen genetischen Veränderungen, die sich durch positive darwinistische Selektion bei jetzt lebenden Menschen verbreitet haben, zu entdecken und zu datieren. Diese können dann wie oben skizziert durch interdisziplinäre Untersuchungen mit menschlichen Eigenschaften in Verbindung gebracht werden. So wird ein Zeitplan für die unterschiedlichen Ursprünge von menschlichen Eigenschaften rekonstruiert. Dies wird zu einem tieferen Verständnis der menschlichen Geschichte und der menschlichen Eigenart führen. Es wird auch zur Aufklärung der Ursachen von Krankheiten beitragen, die ausschließlich beim Menschen auftreten.

## NEUE MATERIALIEN PRÄGEN DIE ZEITALTER

Steinzeit, Bronzezeit, Industriezeitalter, Computer-gesellschaft. Was Materialien für die Kultur der Menschheit bedeuten, lässt sich allein an den Epochen ablesen, die nach Werkstoffen und Werkzeugen benannt werden. Während in den vorangegangenen Jahrtausenden natürliche Stoffe wie Hölzer, Steine, Bronze oder Eisen den zivilisatorischen Fortschritt der Menschheit ankurbelten, wäre die industrielle Revolution im neunzehnten Jahrhundert ohne hochfesten Stahl nicht möglich gewesen. Silizium für die Elektronikindustrie und neue Kunststoffe haben den Alltag des vergangenen Jahrhunderts geprägt. Die Herstellung und der Einsatz innovativer Werkstoffe und Gebrauchsmaterialien decken und generieren Bedürfnisse der modernen Zivilisationsgesellschaft. Gleichzeitig fördert dieser Prozess die Entwicklung neuer Technologien und eröffnet neue Betäti-

gungsfelder. Für Experten steht fest: Ein Ende der Entwicklung ist nicht abzusehen. Im Gegenteil: In immer kürzeren Zeitabständen werden neue Stoffe kreiert und produziert. Für Laien ist die komplexe Materie kaum mehr nachvollziehbar, und die Herstellung neuer Materialien forciert den Wettbewerb der Unternehmen. Ob die nächsten Jahrzehnte von funktionellen Nanostrukturen oder der Biomimetik beherrscht werden, oder ob das Zeitalter des Lichtes anbricht, weiß niemand. Was sich hinter diesen Schlagworten verbirgt und wie Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der Max-Planck-Gesellschaft versuchen, die physikalischen Eigenschaften von Licht und Materie zu verstehen und durch die Erfindung oder Entwicklung neuer Materialien zum gesellschaftlichen Fortschritt beizutragen, zeigt dieses Kapitel.



### BIOMIMETISCHE MATERIALFORSCHUNG UND BIONIK

51



### MODERNE FUNKTIONSMATERIALIEN

53



### PHOTONIK UND QUANTENOPTIK

56

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN

Natürliche Rohstoffe wie Seide, Holz, Bambus oder Zahnschmelz sind selbst im 21. Jahrhundert noch vielen technischen Materialien überlegen. Dies liegt daran, dass die evolutionär optimierte Natur die Stärken jedes einzelnen Moleküls an seinem Platz in einer Nano- und Mikrostruktur optimal ausnutzt. Gleichzeitig ist die Natur auf nur wenige Grundstoffe beschränkt und kennt beispielsweise keine Metalle oder Halbleiter. Das Ziel der biomimetischen Materialforschung in der Max-Planck-Gesellschaft ist es, durch sorgfältige Analyse die Prinzipien der Natur zu verstehen und bei synthetisch hergestellten Werkstoffen anzuwenden: Nicht kopieren, sondern erweitern heißt die Maxime. Bessere Leichtbaukonstruktionen im Automobilsektor, eine neue Architektur, aber auch neuartige Klettverschlüsse oder zurückwachsende Zahnfüllungen sind mögliche Anwendungen solcher Forschungen.

## BIOMIMETISCHE MATERIALFORSCHUNG UND BIONIK

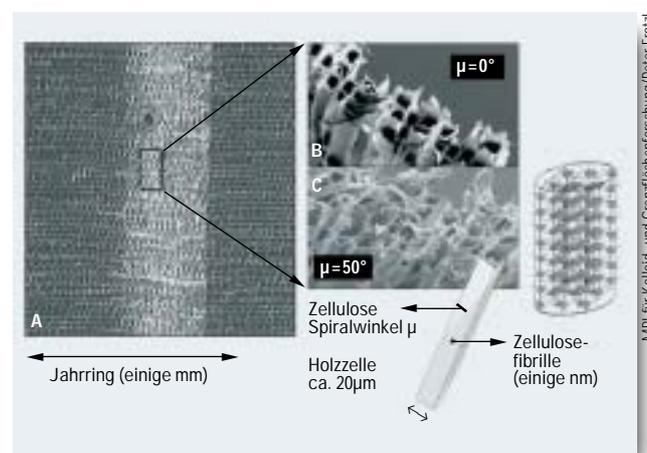
### Interdisziplinärer Ansatz

Die als Bionik oder Biomimese bezeichnete Methode, Naturprinzipien in die Technik zu übertragen, ist keineswegs neu: Ohne eine genaue Beobachtung der Vögel wären Flugzeuge wohl kaum konstruiert worden, und die Entwicklung moderner Kunststoffe basiert auf dem Studium der Zellulose. Die Ingenieure übertrugen in der Vergangenheit jedoch die natürlichen Prinzipien lediglich in groben Strukturen. Nur selten wurde das natürliche System mit den Augen eines Technikers und das technische System mit den Augen eines biologisch orientierten Naturwissenschaftlers analysiert. Das hat sich gewandelt: Das systematische interdisziplinäre Vorgehen legte den Grundstein für die moderne biomimetische Materialentwicklung.

### Die Prinzipien der Natur übertragen

In der Natur kommen nur wenige Grundstoffe vor. Zu finden sind fast ausschließlich organische Moleküle und wenige Minerale, jedoch keine Metalle, Legierungen, Keramiken und Halbleiter. Das liegt daran, dass viele technische Werkstoffe nur unter hohen Temperaturen hergestellt und geformt werden können, jedoch solch extreme Temperaturen in der belebten Natur nicht vorkommen. Während des biologischen Wachstumsprozesses werden winzige organische und mineralische Bausteine zu größeren Einheiten zusammengefügt, bis schließlich ein Organ oder eine Pflanze entsteht. Das Bemerkenswerte daran ist, dass es einem Baum auch ohne die Verwendung von harter Materie gelingt, hohe und gleichzeitig extrem feste Säulen zu errichten. Das wird durch einen raffinierten Aufbau von der molekularen bis zur makroskopischen Ebene erreicht, den die Forscher erst langsam zu verstehen beginnen. Biomimetische Materialien können neben der oben beschriebenen Festigkeit auch natürli-

che Prinzipien nutzen, mit denen unterschiedliche Funktionalitäten wie haftende oder glatte Oberflächen, farbige oder transparente Erscheinung, elastisches oder steifes Verhalten erreicht werden. Die komplizierte Struktur von Holz (Abb. unten) oder Muscheln direkt nachzubauen, ist hingegen nicht sinnvoll. Einzige Ausnahme: Implantatmaterialien, die dem natürlichen Vorbild möglichst ähnlich sein sollen, damit sie vom Körper tatsächlich angenommen und in das lebende Organ integriert werden können. In diesem Zusammenhang wird auch die Selbstorganisation und Morphogenese von Apatit-Gelatine-Nanokompositen untersucht, womit zum näheren Verständnis der Bildung und Stabilität von Knochen und Zähnen beigetragen werden kann.



Hierarchischer Aufbau des Holzes: Innerhalb der zwei Jahresringe einer Fichte (Abb. A) mit dem Frühholz (EW) und dem Spätholz (LW) bestimmt die Ausrichtung der Zellulosefibrillen (Abb. B, C) das Verformungs- und Bruchverhalten des Holzes.

### Kleinste Dimensionen fordern Forscher

Die unterschiedlichen Funktionen der Materialien sowie ihre mechanischen, optischen, elektronischen und magnetischen Eigenschaften werden durch Strukturen im Nanometerbereich bis hin zum Mikrometerbereich bestimmt. Auch ob eine Oberfläche haftend, glatt, rau, schmutzabweisend, glänzend oder matt ist, hängt von den Strukturen in diesem Größenbereich ab. In der Materialforschung wird daher viel investiert, um in dieser Skala Strukturierungsmöglichkeiten zu entwickeln und einzusetzen. Schwerpunktmäßig werden in der heute viel diskutierten Nanotechnologie neue Materialien entwickelt, bei denen durch Nanostrukturierung eine neue Funktionalität erreicht werden soll. In diesem Bereich hat aber die Natur mit ihrem Herstellungsverfahren entscheidende Vorteile und ist daher noch kaum zu schlagen: So nutzen Nanostrukturen die molekulare Selbstanordnung und wachsen von alleine (self-assembly).

Daraus entsteht eine Vielfalt von unterschiedlichen Funktionen: Molekulare Motoren können winzige Lasten gezielt durch eine Zelle transportieren, Enzyme steuern molekulare Syntheseprozesse oder Molekülaggregate verwandeln Licht in chemische oder elektrische Energie. Spezielle Molekülanordnungen lassen Wasser und Schmutz an Oberflächen abperlen, und die Verbindung von Kalkmineral mit wenigen organischen Molekülen macht Muschelschalen 2000-mal bruchfester als Kalkstein. Weitere Beispiele aus dem Nanobereich: Geschickte Molekülanordnungen machen die Hornhaut transparent, während andere Gewebe wie Käfer und Schmetterlingsflügel dadurch farbig oder irisierend werden. In den meisten Fällen ist der Zusammenhang zwischen Struktur und physikalischer Eigenschaft bisher kaum verstanden, noch weniger weiß man über mögliche Synthesewege von solch strukturierten Materialien. Beide Forschungsbereiche stehen auf der Agenda der Max-Planck-Forscher.

### Multifunktionale Materialien

Während in der Technik vielfach noch jede Funktion durch ein eigenes Bauteil bestimmt wird, hat die Natur ihre Ma-

### BETEILIGTE INSTITUTE

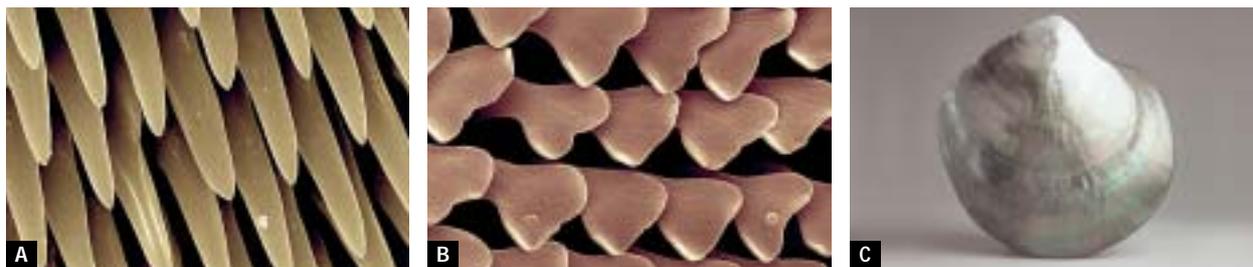
- MPI für chemische Physik fester Stoffe, Dresden
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf
- MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für Metallforschung, Stuttgart

terialien gleich multifunktional angelegt. Perlmutter (s. Abb.) etwa verbindet seine enorme Festigkeit mit interessanten optischen Eigenschaften und verhindert gleichzeitig, dass sich Verunreinigungen anhaften können. An diesem Beispiel zeigt sich das große Potenzial der biomimetischen Materialforschung. Die Kombination von Miniaturisierung und Multifunktionalität lässt viele potenzielle Anwendungen in der Optik, Mikroelektronik und Sensorik erwarten, aber auch stark verbesserte Strukturmaterialien für den Flugzeug-, Hochhaus- und Brückenbau.

### Neue Methoden für ein neues Forschungsfeld

Die biomimetische Materialforschung erfordert einen grundsätzlich interdisziplinären Ansatz mit Beiträgen aus Chemie, Physik, Biologie sowie den Ingenieurwissenschaften. Notwendig ist auch, dass kombinierte Charakterisierungsmethoden entwickelt und benutzt werden, die den biologischen Charakter und die Nanostruktur dieser Proben berücksichtigen. Besonders der komplexe hierarchische Aufbau stellt eine Herausforderung für die Analytik dar. Spektroskopische sowie licht- und elektronenmikroskopische Methoden, Neutronen- und Röntgenbeugung werden ebenso weiterentwickelt werden müssen wie numerische Simulationstechniken. Als zerstörungsfreie Messmethode hat sich die Synchrotronstrahlung für die Charakterisierung hierarchischer Materialien als besonders zukunfts-trächtig erwiesen. Durch eine erhöhte Brillanz des Röntgenstrahls in Synchrotronquellen der nächsten Generation und mit dem Freien Elektronenlaser sind noch wesentliche Fortschritte zu erwarten.

MPI für Metallforschung/Stanislav N. Gorb (A, B)  
MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung (C)



Kunststück der Natur: Perlmutter (Abb. C) verhindert jede Anlagerung – im Gegensatz zu anderen Oberflächen wie die Kopfarretierung der Libelle (Abb. A und B), die als Verbindung konstruiert ist.



In der menschlichen Entwicklungsgeschichte spielt die Herstellung von nicht in der Natur vorhandenen Materialien eine zentrale Rolle. Nachdem der Fokus zuerst auf mechanischen Werkstoffen lag (etwa dem Eisen für Waffen), wurden dann später andere Funktionen wie optische, elektrische, magnetische, aber auch katalytische Eigenschaften wichtig. Kein Teleskop ohne hochreines Glas, kein Kompass und damit keine Weltreise ohne Magnetnadel. Im Zuge der jüngsten Technikgeschichte sind die Anforderungen an Materialien mit immer neuen Funktionen und immer höherer Empfindlichkeit sowie Selektivität wahrhaftig „explodiert“. Die Nachhaltigkeit unserer gesellschaftlichen Entwicklung wird zweifelsohne von der Verfügbarkeit neuer Lösungen auf der Basis von Funktionsmaterialien abhängen. Neue Elektroden, bessere Batterien, hochempfindliche Sensoren, Membranen für die Brennstoffzelle, neue Katalysatoren, die Bibliothek auf dem Chip oder neue elektronische Komponenten: Das sind nur einige Schlaglichter aus einer langen Liste, die uns fasziniert in die Zukunft schauen lässt.

## MODERNE FUNKTIONSMATERIALIEN

### Funktionsmaterialien reagieren auf ihre Umgebung

Funktionsmaterialien reagieren üblicherweise auf äußere Einflüsse und ändern ihre Eigenschaften: Mit der Temperatur ändert zum Beispiel der Supraleiter seine Leitfähigkeit und die Formgedächtnislegierung ihre Gestalt, die Solarzelle produziert Strom bei Lichteinfall und das Display leuchtet unter Strom, unter Spannung dehnt sich der Piezo-Aktuator aus und das Peltierelement wird kalt, im wechselnden Magnetfeld schließt und öffnet sich das Relais und der Lautsprecher brummt. Durch geschicktes Kombinieren von solchen passiven Funktionseinheiten entstehen aktive Funktionseinheiten, die in komplizierten Maschinen wie Mobiltelefonen und Großrechnern eingesetzt werden. Die immer wichtiger werdende Datenverarbeitungs- und Prozessortechnik gibt ein eindrucksvolles Beispiel für den vielfältigen Einsatz und Nutzen moderner Funktionsmaterialien und deren Entwicklungsgeschwindigkeit. Am Beispiel des Laptops ist zu sehen, dass mithilfe von möglichst kleinen Strukturen maximale Funktionalität bei wenig Platz-, Material- und Energieverbrauch realisiert wird.

### Daten speichern auf kleinstem Raum und in kürzester Zeit

Die moderne Elektronik basiert auf Silizium als Funktionsmaterial. Ein Prozessor besteht aus kleinen Transistoren von inzwischen nur 160 Nanometern (Milliardstelmeter) Größe. Damit Informationen auf kleinstem Raum für längere Zeit konserviert werden können, werden Daten konventionell mit magnetischen Materialien auf Bändern und Festplatten gespeichert. Ähnliches leistet die DVD (Digital Versatile Disc), bei der die Speicherung auf dem Prinzip einer lokalen Phasenumwandlung – amorph und kristallin – beruht. Beide Speichermedien haben jedoch

unterschiedlich große, charakteristische Strukturbreiten: Bei den Magnetaufzeichnungen sind die Forscher mit realisierbaren 30 Nanometerstreifen dem Ziel, ein Terabit/cm<sup>2</sup>, also 1000 Gigabytes zu speichern, schon ziemlich nahe gekommen. Eine DVD hingegen speichert acht Gigabytes, also deutlich weniger. Im Vergleich zu den magnetischen Systemen hat die DVD noch weitere Schwächen: Die Schreibgeschwindigkeit einer DVD ist langsamer und der Energieverbrauch bei der Datenverarbeitung deutlich höher.

### Schnell und effektiv an die Außenwelt ankoppeln

Das kontaktfreie Auslesen der geschriebenen Informationen geschieht bei der DVD mit einem Laser. Durch die Entdeckung des Riesenmagnetwiderstandes (Giant Magnetoresistance, kurz: GMR) wurde die magnetische Datenspeicherung revolutioniert. Zwei magnetische Schichten sind beim GMR durch eine nur einen Nanometer starke Kupferlage getrennt, die ihre Magnetisierungsrichtung spontan antiparallel orientieren, was mit einem großen elektrischen Widerstand verbunden ist. Die Leitfähigkeit erhöht sich enorm, wenn sich – wie das beim Überstreichen einer magnetischen Struktur der Fall ist – das äußere Magnetfeld nur geringfügig ändert. So können auch 30 Nanometer kleine magnetische Informationen in die makroskopische Welt effektiv übertragen werden. Der GMR zeigt eindrucksvoll, was durch die systematische Erforschung der Nanostrukturen in Funktionsmaterialien erreicht werden kann. Die künftige Entwicklung zielt darauf ab, solche Elemente mit niedrigem Energieverbrauch auch in aktiven Prozessoren, den so genannten MRAMs (Magnetic Random Access Memories) einzusetzen. Diese Prozessortechnologie basiert auf dem Tunnelmagnetwiderstand, bei dem

eine perfekte, nichtmagnetische Zwischenschicht die beiden magnetischen Lagen voneinander trennt. Da das Tunneln der Elektronen einen kleinen Widerstand verursacht, ist dieses Verfahren nur dann leicht möglich, wenn die Ladungsträger in den magnetischen Schichten die gleiche Magnetisierungsrichtung vorfinden.

#### Jenseits der Elektronik: Batterien, Zellen und Katalyse

Es sind die speziellen Eigenschaften von Festkörpern, die diesen Effekten und den darauf aufbauenden visionären Anwendungen zu Grunde liegen. Der Siegeszug der Elektronik wurde erst möglich, weil die Elektronen eines festen Körpers in einer präzise vorgegebenen Grundstruktur beweglich sind. Der Grund für den Erfolg von Festkörpern in elektrochemischen Anwendungen basiert auf der Tatsache, dass bei zumindest einer unbeweglichen Spezies im Kristallgitter die andere hohe Beweglichkeiten aufweist. Das Verständnis und die Kontrolle solcher Effekte sind in der nächsten Generation von Solarzellen, bei der Herstellung von leistungsfähigeren Batterien oder der direkten Umsetzung von chemischer Energie zu Strom in der Brennstoffzelle von großer Bedeutung. Besonders der Kontrolle von struktureller und kompositorischer Komplexität in Funktionsmaterialien auf der mesoskopischen Ebene wird von Fachleuten große Bedeutung zugemessen. Ähnliche Effekte und Materialien sind auch in der Katalyse wichtig: Chemische Reaktionen, in Raffinerien auf größter Skala durchgeführt, liefern heutzutage neben dem eigentlich angestrebten Produkt über Nebenreaktionen auch unerwünschte Beiprodukte. Die perfekte Kontrolle des Reaktionszentrums auf atomarem Niveau am Festkörper und die damit angestrebte vollständige Lenkung der Reaktion auf nur ein Produkt hin ist der „heilige Gral“ der Katalyse: 100-prozentige Selektivität.

#### Atom für Atom analysieren und kontrollieren

Mit Hilfe moderner Rastersondentechniken lassen sich heute schon in vielen Fällen Oberflächen Atom für Atom analysieren. Die erhöhte Beweglichkeit von Atomen auf der Oberfläche erlaubt aber auch weitergehend, mit diesen Verfahren lokal atomgenaue und metastabile Strukturen zu erzeugen oder chemische Reaktionen in Gang zu setzen. Quantendrähte (siehe linke Abb.) werden durch moderne Präparationstechniken gewonnen. Sie haben aufgrund der Randbedingungen und Quanteneffekte von großen Systemen völlig unterschiedliche Transport- und Materialeigenschaften. Die atomaren Kobaltketten aus durchschnittlich 80 Atomen stellen den derzeit kleinsten Magneten der Welt dar. Der Ferromagnetismus geht auf die sehr große magnetische Anisotropieenergie der einzelnen Kobaltatome in den Ketten zurück. Der Ferromagne-

tismus und die Anisotropie in atomar kleinen Nanostrukturen haben weitreichende Implikationen. Auch in diesem Falle erreicht der Festkörper seine untere Grenze bei den einzelnen Atomen. Eine anderes Beispiel für kleinste Festkörper, die in der Max-Planck-Gesellschaft erforscht werden, sind Kohlenstoff-Nanoröhren (siehe rechte Abb.). Diese haben in vielerlei Hinsicht bemerkenswerte Eigenschaften: Sie sind mechanisch außergewöhnlich fest und außerdem hervorragende kalte Elektronenemitter sowie elektronische Alleskönner. Die Kohlenstoff-Nanoröhren eignen sich perfekt zum Aufbau sowohl klassischer als auch quantenmechanischer Bauelemente der Nanoelektronik.

Neben der Nanoelektronik werden auch andere moderne technologische Systeme auf solch kleinere, aber noch effizientere Einheiten zurückgreifen. Rückgekoppelte Systeme werden die menschliche Umgebung kontrolliert analysieren und beeinflussen und beispielsweise für einen besseren Komfort in modernen Fahrzeugen sorgen. Hierfür benötigte Sensoren und Aktuatoren werden – sofern sie dezentral oder autark eingesetzt sind – vielleicht sogar metabolistisch über Brennstoffzellen oder durch Solarenergie gespeist sein. Diese Einheiten wiederum beruhen auf Funktionsmaterialien.

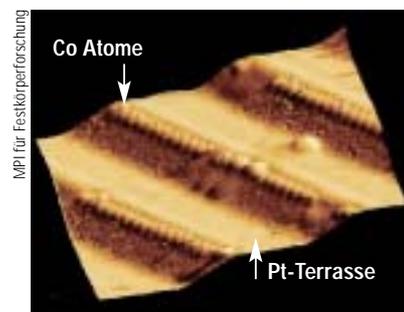


Abb. links: Nanodrähte aus Kobaltatomen werden mithilfe moderner Präparationstechniken hergestellt.

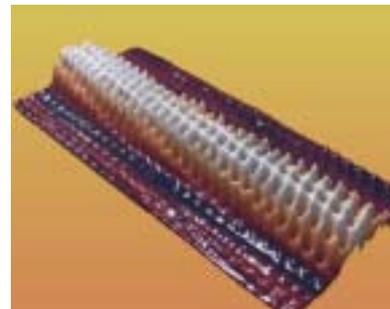


Abb. rechts: Kohlenstoff-Nanoröhren eignen sich zum Bau von klassischen und quantenmechanischen Bauelementen.

#### Oxide als „Alleskönner“

Unter Experten gelten oxidische Materialien als sehr viel versprechende Kandidaten für die weitere Forschung. Schon das einfache Aluminiumoxid ist eines der wenigen Materialien, aus denen defektarme Oxidschichten hergestellt werden können. Aluminiumoxid stellt als dünne keramische Schicht die einzig handhabbare Tunnelbarriere dar und ist gleichzeitig ein hervorragender Korrosions- und



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für die chemische Physik fester Stoffe, Dresden
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf
- MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für Metallforschung, Stuttgart
- MPI für Mikrostrukturphysik, Halle
- MPI für Plasmaphysik, Garching und Greifswald
- Max-Planck-Forschungsgruppe „Mechanik der Polymere“ an der Technischen Universität Darmstadt
- Fritz-Haber-Institut der MPG, Berlin

Hitzeschutz sowie Ausgangsmaterial für neue Katalysatorsysteme. Trickreich präpariert verhindert Aluminiumoxid, dass heiße Fusionsreaktorwände spröde werden sowie das Eindringen des radioaktiven Tritiums. Aluminiumoxid ist auch ein wichtiger Träger für Metallnanoteilchen in der Katalyse. Ein detailliertes Verständnis seiner Oberflächen ist von grundlegender Bedeutung für viele praktische Probleme. Die Oberflächenforschung mit ihren bereits hoch entwickelten Methoden spielt hier eine zentrale Rolle, die direkt in die Technik ausstrahlt.

In wesentlich komplizierteren Oxiden, den natürlich geschichteten Perovskiten, treten unter anderem magnetfeldgetriebene Metall-Isolator-Übergänge (Colossal Magneto Resistance) auf. Diese Systeme sind mit Schichtabständen von ebenfalls rund einem Nanometer den oben genannten physikalisch erzeugten GMR-Systemen sehr ähnlich. Auch die Hochtemperatursupraleiter gehören zur Familie der Perovskite.

Die aktuelle Grundlagenforschung an solchen Materialien führt fast automatisch zur Erschließung neuer Anwendungen. Denkbar sind beispielsweise Anwendungen als funktionelle Verbundmaterialien (die ihre Belastung erkennen oder bei Belastung versteifen), passive Sensoren mit reduzierten Dimensionen bis hin zu neuartigen Komponenten in Schaltkreisen und Prozessoren. Erste Prototypen, so genannte MRAM- und RSFQ-Chips (Rapid Single Flux Quantum), funktionieren bereits. Die jetzigen Systeme haben jedoch im Gegensatz zu Einkristallen noch viele Defekte, die die gewünschten Eigenschaften zerstören können. Ihre fehlerfreie Herstellung ist in den

nächsten Jahren eine der Herausforderungen der Forschung in diesem Bereich.

#### Besseres Verständnis durch bessere Analyse

Die meisten der faszinierenden Eigenschaften zukünftiger Funktionsmaterialien sind noch unbekannt, also *terra incognita*. Um die Werkstoffe zielgerichtet zu verbessern, ist neben der Erzeugung von neuen Modellsystemen eine verbesserte theoretische Basis gefragt. Außerdem benötigen die Forscherinnen und Forscher möglichst viele Informationen über die reale Struktur einer Probe. Durch Weiterentwicklungen der hochauflösenden Elektronenmikroskopie und der Rastersondenmethoden wird heute atomare Auflösung erreicht. Auch die hoch brillante Synchrotronstrahlung führte zu einer rasanten Entwicklung in der Kristallographie, Spektroskopie und Röntgenmikroskopie. Motiviert durch die Explosion der Möglichkeiten wird heute schon intensiv an der Strahlungsquelle der vierten Generation gearbeitet: dem Freien Elektronenlaser. Dieser kombiniert eine wesentlich höhere Intensität mit einer sehr feinen Zeitstruktur. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hoffen, mit dieser Technologie sowohl extrem kleine Strukturen mit höchster Empfindlichkeit als auch zeitabhängige Phänomene wie Reaktionsabläufe, thermische Dissipation bis hin zu den komplexen Wechselwirkungsmechanismen von Elektronen untereinander studieren zu können.

Die gezielte Einflussnahme auf die Zustände und Bewegung mikroskopischer Materie ist eine der großen Aufgaben der modernen Naturwissenschaften. Präzise kontrolliertes Licht ist ein einzigartiges Instrument, um diese Aufgaben erfüllen zu können. Modernste kohärente Lichtquellen und neueste optische Technologien geben tiefe Einblicke in mikroskopische Strukturen und Prozesse der Materie. Sie erlauben auch die genaue Messung der Eigenschaften von Materie sowie die Kontrolle deren Bewegung. Die erwarteten Auswirkungen reichen von der Anwendung von Quanteneffekten (Quanteninformationstechnik und Quantengase) über präzise Tests von Theorien des sehr Kleinen (Mikrokosmos) und des sehr Großen (Universum) bis hin zur Echtzeitverfolgung von Prozessen tief im Inneren von Atomen, Molekülen und biologischer Materie mit Attosekunden-Auflösung.

## PHOTONIK UND QUANTENOPTIK

### Das Zeitalter des Lichts und der Information

Die Experimente von Max Planck und Albert Einstein zeigten Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts, dass elektromagnetische Strahlen körnig sind und Energie in kleinen Paketen durch die so genannten Photonen transportiert wird. Diese Erkenntnis war zunächst ohne jegliche praktische Bedeutung, führte jedoch 60 Jahre später zur Erfindung des Lasers. Weitere vier Jahrzehnte später sind auf Laserlicht basierende optische Technologien aus der modernen Informationsgesellschaft nicht mehr wegzudenken. Ohne Laser wären heute die Datenübertragung über große Distanzen und ein schneller Zugriff auf große Datenmengen wie bei der Compact Disc (CD) genauso unvorstellbar wie die Herstellung von Computerchips oder feinste Eingriffe in der Augenchirurgie. Die Revolution, die Laserlicht in der Wissenschaft und Technik ausgelöst hat, ist noch lange nicht zu Ende. Modernste Lichtquellen im sichtbaren, ultravioletten und Röntgen-Bereich (kurz: Licht) sowie neueste optische Technologien und Komponenten eröffnen völlig neue Perspektiven für die Nutzung von Licht-Materie-Wechselwirkungen sowie in der Erforschung des Mikro- und Makrokosmos. Laserlicht verbindet wie kaum ein anderes wissenschaftliches Werkzeug unterschiedlichste Forschungsgebiete und verspricht in den kommenden Jahren zahlreiche neue Brücken zwischen Instituten und der Gesellschaft, aber auch im Anwendungsbereich zu schlagen. Im Folgenden werden einige Forschungsschwerpunkte der Max-Planck-Gesellschaft zusammengefasst.

### Quantencomputer bieten neue Möglichkeiten

Transistoren schneller Mikroprozessoren werden immer kleiner. In zehn bis zwanzig Jahren erreichen sie möglicherweise Strukturgrößen im atomaren Bereich. Dann eröffnet

die Quantenphysik vollkommen neue Möglichkeiten zur Verarbeitung von Informationen, da die Informationsträger nicht nur die beiden Zustände „an“ oder „aus“, sondern auch beliebige Überlagerungen annehmen können. Quantencomputer bieten die Chance, komplexe Systeme zu verstehen, die mit klassischen Computern nicht simuliert werden können. Beispiele dafür reichen von der Hochenergiephysik über die Quantenchemie und Physik der kondensierten Materie sogar bis zu den Sozialwissenschaften. Allerdings ist die Simulation von menschlichem Verhalten und gesellschaftlichen Interaktionen mit dem so genannten „agent based modelling“ nicht möglich. Denn für dieses Modell-Rechenprogramm ist das soziale Verhalten der Menschen zum Beispiel in Rechtsfällen einfach zu komplex. Eine andere, besonders faszinierende Forschungsrichtung betrifft die Entwicklung eines Quanten-Netzwerkes: Dort läuft Information abhörsicher über große Entfernungen von einem Knoten zum anderen, und die Verarbeitung von Information erfolgt rein optisch.

### Optische Atomuhr mit kalten Molekülen

Mit Licht können atomare Gase in die Nähe des absoluten Temperaturnullpunkts gekühlt und dort in einem bisher nicht möglichen Ausmaß kontrolliert werden. Kalte Moleküle eröffnen ebenfalls neue Forschungsperspektiven. Einzelne gespeicherte Ionen bieten die Möglichkeit, eine „optische“ Atomuhr zu entwickeln. Deren Genauigkeit übertrifft die der Cäsium-Atomuhr, auf der unsere Zeitmessung beruht, um mehrere Größenordnungen. Eine genauere Uhr mit Laser-Frequenzkamm als Unruh würde hoch präzise Tests zu fundamentalen Fragen der Physik ermöglichen – beispielsweise die vermutete Konstanz von Naturkonstanten oder die Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie.



Da die Eigenschaften der Elementarteilchen direkt mit der Entwicklung des Kosmos verknüpft sind, erwarten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Erkenntnisse über die Entstehung und Entwicklung des Universums. Präzisionsmessungen mit frequenzstabilisierten Lasern werden auch in künftigen Weltraumexperimenten zum Nachweis von Gravitationswellen eine Schlüsselrolle spielen.

### Nanooptik: Grundlage für den Zukunftsmarkt

Die Strukturierung von Materialien auf einer Nanometer-Skala mit Licht führt zu neuen optischen Komponenten – beispielsweise zu einer mit negativem Brechungsindex, die eine fehlerfreie Abbildung ermöglichen würde. Auch im Bereich der Mikrolinsen und der optischen Elemente, die auf der Beugung beruhen, sind gerade Entwicklungen zugegangen, die breite technische Anwendung versprechen. So könnte in der nahen Zukunft eine komplette optische Datenübertragung ohne elektronische Zwischenelemente ermöglicht werden, was wiederum zu größeren Datenübertragungsraten führen wird. Dieser Bereich stellt auch für die Wirtschaft und Gesellschaft einen enormen Zukunftsmarkt dar, für den die Wissenschaft in den kommenden Jahren die Grundlagen erarbeitet.

### Einblicke in fundamentale Prozesse der Materie

Besser kontrollierte hochintensive Lichtpulse ermöglichen es am Max-Planck-Institut für Quantenoptik erstmals, Elektronen auf atomarer Zeit- und Längenskala zu steuern. Neueste Attosekundenmesstechniken und Vielteilchenabbildungstechnologien ermöglichen direkte Einblicke in fundamentale Prozesse der Materie. Die ultrastarken elektromagnetischen Felder einer künftigen Petawatt-Lichtquelle können auch über Millimeter-Distanzen Elektronen und Protonen auf hochrelativistische Energien beschleunigen und dadurch gebündelte Teilchen- sowie Röntgen- und Gammastrahlen erzeugen. Es wird sogar darüber spekuliert, ob Kerne so zur Fusion gebracht werden können. In ihrer Brillanz und Kürze werden diese hochenergetischen Teilchen- und Lichtpulse alle bisherigen nuklearen Quellen übertreffen und völlig neue Werkzeuge für die Erforschung der Atomkerne und Atomhüllen sowie von komplexen (biologischen) Molekülen bereitstellen.

### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Gravitationsphysik, Potsdam, Hannover
- MPI für Kernphysik, Heidelberg
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für medizinische Forschung, Heidelberg
- MPI für Neurobiologie, Martinsried
- MPI für Physik komplexer Systeme, Dresden
- MPI für Quantenoptik, Garching
- Max-Planck Forschungsgruppe „Optik, Information und Photonik“ an der Universität Erlangen-Nürnberg
- Fritz-Haber-Institut der MPG, Berlin

### Tiefe Blicke in biologische Systeme

Die Fortschritte in der Lichtmikroskopie sind in der jüngeren Vergangenheit größtenteils auf die Entwicklung neuer Laserlichtquellen zurückzuführen. Erst gepulste Lichtquellen haben die Ausnutzung nichtlinearer optischer Effekte erlaubt und damit die tiefe Beobachtung von lebenden Geweben oder die Betrachtung biologischer Strukturen mit optischer Superauflösung. In Zukunft werden diese Abbildungsverfahren stark von der Verfügbarkeit wellenlängenabstimmbarer Lichtquellen mit kürzeren Lichtpulsen profitieren. Die Erforschung solcher Lichtquellen hat somit auch auf die Lebenswissenschaften einen unmittelbaren Einfluss.

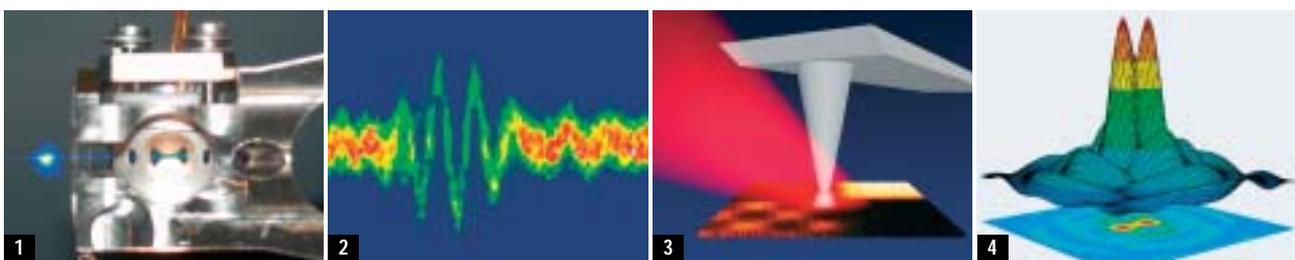
1) Mit einem optischen Resonator wird die Quantenschnittstelle zwischen einem ruhenden Atom und einem fliegenden Lichtteilchen realisiert. Eine Wolke von Atomen (links) wird mit einem Laserstrahl zwischen zwei hoch reflektierende Spiegel (Mitte) transferiert.

2) Die Aufnahme eines Attosekunden-Röntgenpuls zeigt, dass Lichtschwingungen erstmals perfekt beherrscht und messbar sind und somit für die präzise Steuerung von Elektronen in Atomen und Molekülen eingesetzt werden können.

3) Die Beleuchtung einer Antennenspitze mit Laserlicht ergibt einen winzigen Brennfleck, mit dem man ein Objekt durch Abrastern mit Nanometer-Auflösung ultrascharf mikroskopieren kann.

4) Fokussierung von Licht in einen Bereich kleiner als die Wellenlänge. Damit werden traditionelle optische Grenzen überwunden.

MPI für Quantenoptik/Gerhard Rempe (1)  
 MPI für Quantenoptik, TU Wien/Ferenc Krausz (2)  
 MPI für Biochemie/Nenad Ockalic (3)  
 Max-Planck-Forschungsgruppe für Optik,  
 Information und Photonik/Susanne Quabis (4)



## INFORMATION: TECHNIK, LEBEN UND KULTUR

Wissen generiert sich nicht von selbst: Es entsteht durch die unablässige Verknüpfung von Informationen, Analyse und Erkenntnis. Wissen braucht Information, Wissen schafft Information. Die Dynamik der modernen Wissenschaftsentwicklung beruht auf der Schnelligkeit und Unmittelbarkeit des Austausches von neuen Informationen. Die Informatik hat unsere Lebens- und Arbeitsweise grundlegend verändert: Die Menschen stehen mitten in einer Revolution der Wissensvermittlung, wie es sie seit der Erfindung der Buchdruckkunst vor über 500 Jahren nicht mehr gegeben hat. Die Nutzung und kreative Weiterentwicklung der neuen Technologie verbindet die unterschiedlichen Sektionen der Max-Planck-Gesellschaft. Wie kann Information mit Maschinen verarbeitet werden? Wie kann die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine auf eine Ebene gehoben werden, die dem Menschen angemessen

ist? Das sind zwei wesentliche Fragestellungen der Chemisch-Physikalisch-Technischen Sektion (CPTS). Ein Untersuchungsbereich der Biologisch-Medizinischen Sektion (BMS) beschäftigt sich mit dem Thema: Wie wird Information von Lebewesen verarbeitet und wie spielen dabei Körper und Geist zusammen? Welche Bedeutung hat Wissen und Information für die Gesellschaft früher und heute, wie können neue technische Möglichkeiten für die wissenschaftliche Erkenntnis genutzt werden und welche Konsequenzen zeichnen sich durch den Einsatz der Informatik für die moderne Wissenschaft und Gesellschaft ab? Das sind Fragen aus der Arbeit der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftlichen Sektion (GSHS). Der moderne Begriff Information bildet die Grundlage für Arbeiten und Projekte in allen Sektionen.



### GRUNDLAGEN NEUER INFORMATIONSTECHNOLOGIEN

59



### INFORMATIONSTECHNOLOGIE IN DEN GEISTES-, HUMAN- UND SOZIALWISSENSCHAFTEN

61



### WISSENSCHAFTSDYNAMIK UND GESELLSCHAFTSDYNAMIK

63

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN



Die Informatik ist eine der zentralen Innovationskräfte des 21. Jahrhunderts. Sie verändert Lebensweise, Ausbildung, Arbeit und Spiel, indem sie die Methoden des Geschäftslebens und der Kommunikation revolutioniert. Um die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu erhalten, muss auch die Grundlagenforschung in der Informatik weiter verstärkt werden. Wissenschaftlich gesehen hat sich die Informatik längst von einer reinen Hilfswissenschaft, also der Nutzung von Rechenleistung als Werkzeug in anderen herkömmlichen Forschungsdomänen, zu einem eigenständigen Forschungsbereich gewandelt. Angesichts der stark gewachsenen Bedeutung der Informatik und der vollkommen neuartigen Fragen, die sich in der Grundlagenforschung stellen, beabsichtigt die Max-Planck-Gesellschaft ihre Forschung in der Informatik weiter auszubauen.

## GRUNDLAGEN NEUER INFORMATIONSTECHNOLOGIEN

### Aufgaben des neuen Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft hat auf seiner Sitzung am 19. November 2004 die Gründung des Max-Planck-Instituts für Softwaresysteme beschlossen. Die neue Forschungseinrichtung soll in Form zweier wissenschaftlich gleichwertiger Teilinstitute an den Standorten Kaiserslautern und Saarbrücken entstehen. Dabei sind im Endausbau fünf Abteilungen mit rund 280 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern geplant. Das neue Max-Planck-Institut hat die Aufgabe, wissenschaftliche Grundlagen für die Entwicklung komplexer Softwaresysteme zu erforschen. Von ihrem reibungslosen Funktionieren sind heute schon beispielsweise unternehmensübergreifende Geschäftsprozesse, weltweit operierende Telekommunikationsnetze sowie große Teile der Automobil- und Flugzeugfertigung abhängig. Die steigende Komplexität und die wachsenden Anforderungen im Hinblick auf Funktionalität, Nutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Mobilität stellen große Herausforderungen dar, die prinzipielle wissenschaftliche Fragestellungen berühren.

Das Institut soll sich besonders mit folgenden Themenfeldern beschäftigen:

1. Innovative Programmiersprachen und Programmierparadigmen: Heute in der Praxis weit verbreitete Programmiersprachen sind immer noch (zu) stark geprägt vom alten Prinzip des sequenziell arbeitenden, nicht vernetzten „von Neumann“-Rechners. Zukünftige Systeme erfordern in einem viel stärkeren Maß Programmierparadigmen, die Asynchronität, Parallelität, Verteiltheit, Vernetztheit und flexibles Reagieren auf nicht immer gegebene Verfügbarkeit direkt mit ihren Sprachkonzepten unterstützen.

2. Modelle der Softwaretechnik: Das Software-Engineering großer Systeme ist weitgehend eine Frage der Modellbildung. Erforderlich sind Grundlagenarbeiten, welche die Fragen der Modelle und Modellbildung im Softwareentwicklungsprozess klären und auf dieser Basis die wesentlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Teilen im Entwicklungsprozess untersuchen und festlegen.

3. Eingebettete Systeme: Eingebettete Systeme – 98 Prozent aller programmierbaren Prozessoren laufen eingebettet – enthalten heute umfangreiche und meist vernetzte Softwareanteile. Deshalb muss gerade auf diesem Gebiet, das viele Fragen im Zusammenhang mit der Behandlung von analogen und digitalen Systemen aufwirft, neue Grundlagenforschung betrieben werden.

4. Vernetzte Systeme: Software läuft heute in der Regel auf Netzen. Dies wirft ganz spezifische Fragen auf, wenn beispielsweise die Software in den Netzen ihren physikalischen Ort ändert. Stichworte sind hierbei: dynamische Systeme, mobile Systeme, mobiler Code und Prozessmigration. Hieraus ergeben sich vielfältige neue Fragestellungen etwa zur Replikation und Fehlertoleranz oder zur Modellierung von Leistung, Qualitätseigenschaften und Ressourcenbedarf, die momentan noch ohne gesichertes Grundlagenwissen betrieben werden.

5. Datensicherheit: Eines der schwierigsten Probleme bei komplexen Softwaresystemen ist die Daten- und Zugriffssicherheit, also die Security. Hier stellen sich neue Fragen, die jeden Internet-Nutzer direkt betreffen: Wie identifiziert sich ein berechtigter Nutzer? Wie stellt man sicher, dass der Absender einer Mail wirklich derjenige ist, dessen Name

unter dem Text steht? Wie wird gewährleistet, dass Aktionen im Internet vertraulich bleiben? Diese Fragen lassen sich nur durch die Anwendung von Verschlüsselungstechniken (Kryptografie), neuen Kryptoprotokollen und der Beachtung von Sicherheitsaspekten in Softwarearchitekturen beantworten.

### Max Planck Center for Visual Computing and Communication

Neue Forschungsfelder mit hoher Innovationskraft sind auch geeignet, um neue Organisationsformen in der Wissenschaft zu erproben. Das virtuelle Max Planck Center for Visual Computing and Communication hat im vergangenen Jahr seine Arbeit aufgenommen. In einer Kooperation des Saarbrückener Max-Planck-Instituts für Informatik mit der Stanford University werden besonders qualifizierte Postdocs, betreut von je einem Mentor aus Deutschland und den USA, mit einer kleinen Arbeitsgruppe bis zu fünf Jahre lang eigenständig forschen können. Nach einem zweijährigen Forschungsaufenthalt in Stanford kehren die jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wieder nach Deutschland zurück, um ihre Arbeit am Saarbrückener Max-Planck-Institut fortzusetzen.

Zentraler Forschungsgegenstand ist das gesamte Spektrum des Visual Computing von der 3D-Darstellung über die Modellierung bis hin zur Multimedia-Kommunikation. Typische Fragestellungen sind etwa die Akquisition qualitativ hochwertiger 3D-Objekte und deren realistische Darstellung, Fragen der Geometrieverarbeitung, Datenkomprimierung und Codierung oder eines 3D-Internets. Für die Aufbauphase des Zentrums wurde der Max-Planck-Gesellschaft vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bis zum Jahr 2007 eine Anschubförderung gewährt. Bei entsprechendem Erfolg könnte das Zentrum langfristig ganz in die Hände der Max-Planck-Gesellschaft

Die Bildsequenz stellt eine Rekonstruktion einer Bronze-Büste von Max Planck dar. Die einzelnen Abbildungen der Sequenz zeigen: Originalbüste (links), Rekonstruktion der 3D-Geometrie mittels unstrukturierter Punktwolke (Abb. 2), mittels Triangulierung hieraus erzeugtes Polygonnetz (Abb. 3), schattiertes Polygonnetz (Abb. 4) und die finale Rekonstruktion (mit Rekonstruktion der Materialparameter) (rechte Abb.). Die rechte Abbildung ist also eine vollständige digitale Kopie der Originalbüste.



### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt/Main
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für Psycholinguistik, Nijmegen
- MPI für Softwaresysteme, Kaiserslautern und Saarbrücken

übergehen. Insgesamt vereinigt dieses Projekt mehrere innovative Komponenten: Neben der Erprobung neuer Arbeitsformen wie gemeinsamer Arbeitsgruppen zwischen der Stanford University und dem Max-Planck-Institut für Informatik und der Schwerpunktbildung auf dem aktuellen Gebiet des Visual Computing and Communication ist ein zentrales Element des Projekts der Brückenschlag über den Atlantik, um der zunehmenden Internationalisierung der Wissenschaft gerecht zu werden. Gleichzeitig soll dem Besorgnis erregenden Braindrain von Spezialisten aus Deutschland über den Atlantik durch attraktive Rückkehrperspektiven gegengesteuert werden.

### „Intelligente“ Computersysteme

Als weiteres hoch innovatives Thema mit großem Potenzial wurde innerhalb der Max-Planck-Gesellschaft das Forschungsgebiet „Intelligente Computersysteme“ identifiziert. Intelligentes Verhalten künstlicher Systeme ist nach wie vor eine der großen Herausforderungen, die für viele Anwendungen wichtig ist. Besonders dann, wenn es um die grundsätzliche Definition von Intelligenz geht. Trotz beachtlicher Erfolge auf einzelnen Spezialgebieten kann ein wirkliches Verständnis von Intelligenz nur durch interdisziplinäre Grundlagenforschung über die Fachgrenzen hinweg erfolgen. Da auf diesem Gebiet vielfältige Verbindungen zu den Disziplinen der Lebens- und Geisteswissenschaften wie der Hirnforschung und der Neuropsychologie bestehen, sind hier sektionsübergreifende Forschungen geplant.

Auch Forscherinnen und Forscher in den Geistes-, Human- und Sozialwissenschaften können durch elektronische Berechnung, Vernetzung und Darstellung in bislang ungekanntem Ausmaß wiederkehrende Muster und Besonderheiten in großen Datenmengen entdecken, auswerten und archivieren. Ihre Forschungsgegenstände sind nicht länger ortsgebunden, sondern können weltweit dargestellt und miteinander verknüpft werden. Eine Kooperation zwischen Informatikern und Fachwissenschaftlern ist erforderlich, um den Untersuchungsgegenständen informationstechnisch gerecht zu werden. Die Max-Planck-Gesellschaft wird rechnergestütztes Forschen in den Geistes-, Human- und Sozialwissenschaften durch instituts- und sektionsübergreifende Kooperationen fördern.

## INFORMATIONSTECHNOLOGIE IN DEN GEISTES-, HUMAN- UND SOZIALWISSENSCHAFTEN

**Informationstechnologie eröffnet eine neue Dimension**  
Die Informationstechnologie hat die Forschung in den Geistes-, Human- und Sozialwissenschaften grundlegend verändert. Besonders eindrucksvoll lässt sich dies am Beispiel der historischen Wissenschaften veranschaulichen: In Archiven, Bibliotheken und Museen, in Bauten und Kunstwerken wird das kulturelle Gedächtnis der Menschheit bewahrt und überliefert. Die historischen Wissenschaften befassen sich mit der Entschlüsselung, Analyse und Erschließung dieser Quellen. Indem sie zurückschauen, erweitern sie auch das Verständnis der eigenen Epoche. Sie beleuchten die Grundlagen und Bedingungen des Handelns und der Vorstellungswelt.

Dieses Wissen muss mühsam erarbeitet werden. Die Quellen sind in vielen verschiedenen Sprachen verfasst und über viele Länder verstreut. Sie müssen gefunden, dokumentiert, transkribiert und zusammengetragen werden. Bislang war dies sehr zeitaufwendig und manchmal sogar unmöglich. Hier eröffnet die moderne Informationstechnologie der historischen Forschung eine neue Dimension. Sie befreit die Quellen von ihrer Ortsgebundenheit und macht sie digitalisiert in ihrer ursprünglichen Gestalt verfügbar. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler müssen nicht mehr zu den Quellen gehen, sondern die Quellen kommen aus aller Welt zu ihnen. Material, das einst zusammengehörte und heute weltweit verstreut ist, kann virtuell zusammengefügt und visuell dargestellt werden.

Die vermehrte Nutzung der Informationstechnologie in den historischen Wissenschaften führt zu grundlegenden Veränderungen der Arbeitsweise. Durch Vergrößerungen, Kontraste und Farbhinterlegungen werden Stellen lesbar,

die im Original beinahe unsichtbar waren. Auf hoch aufgelösten Bildern sind die Eigenschaften des Trägermediums wie Papierstruktur und Wasserzeichen sichtbar (Abb. unten). Zeichnungen können auf dem Bildschirm vermessen und bearbeitet, Text- und Bildquellen können zusammengefügt werden. Aus Zeichnungen können dreidimensionale Rekonstruktionen generiert werden (Abb. S. 62).



Unsichtbares sichtbar machen: Wasserzeichen ermöglichen Datierung und Herkunftsbestimmung des Papiers.

Bibliotheca Hertziana – MPI für Kunstgeschichte

Die beiden kunsthistorischen Institute der Max-Planck-Gesellschaft, die Bibliotheca Hertziana in Rom und das Kunsthistorische Institut in Florenz, können vor Ort auf einen reichen Fundus an historischem Material zurückgreifen, der durch die Informationstechnologie in neuer Weise aufgeschlossen und einer kulturgeschichtlich orientierten Bildwissenschaft zugänglich gemacht wird. Vergleiche im europäischen und mediterranen Kontext geben Aufschluss über ei-

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
  - MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
  - MPI für Informatik, Saarbrücken
  - MPI für Psycholinguistik, Nijmegen
  - MPI für Softwaresysteme, Kaiserslautern und Saarbrücken
  - Bibliotheca Hertziana – MPI für Kunstgeschichte, Rom
  - Kunsthistorisches Institut, Florenz
- und alle weiteren Institute der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftlichen Sektion

nen Kulturtransfer. Modellassimilationen und Bildgebrauch eröffnen einen aktuellen Fragenhorizont der Kunstgeschichte im engen Kontakt mit Geschichte, Wissenschaftsgeschichte, Medienwissenschaft und Kognitionsforschung.

#### Digitale Metadaten helfen bei Dokumentation von Sprachcorpora

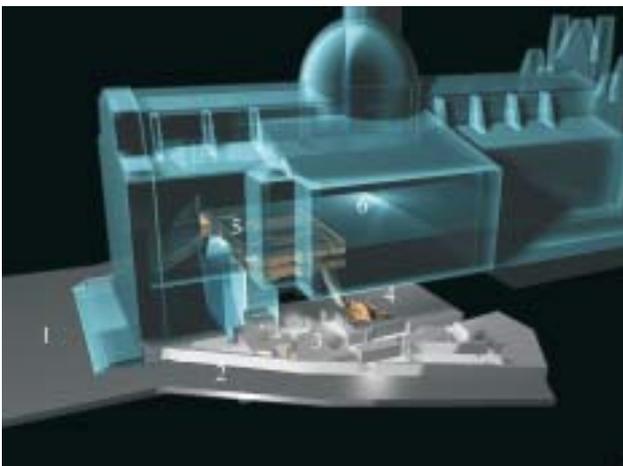
Auch in anderen Bereichen der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaften ermöglicht die Informationstechnologie gänzlich neue Forschungsmethoden. So eröffnen digitalisierte, durch Metadaten angereicherte und durch intelligente Suchverfahren erschließbare Sprachcorpora der Linguistik und ihren Nachbardisziplinen erstmals eine

tiefgehende Beschreibung vieler bislang kaum dokumentierter und vom Aussterben bedrohter Sprachen. In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie betreut das Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen bereits jetzt die weltweit größten digitalen Corpora dieser Art.

Leistungsstarke Rechner gestatten zudem die Überprüfung der oft nur unzulänglich bekannten Eigenschaften statistischer Verfahren. Im World Wide Web vernetzte Rechner erlauben ortsunabhängige, psychologische und soziologische Untersuchungen mit zentraler Datenspeicherung und kontinuierlicher Anpassung der zu bearbeitenden Aufgaben. Internationale Vergleichsstudien wie die unter Mitwirkung des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung durchgeführte PISA-Studie zur Qualität der schulischen Ausbildung sind nur mithilfe moderner Informationstechnologie durchführbar.

Die innovative Nutzung der Informationstechnologie für interdisziplinäre Forschungsfragen wird in den kommenden Jahren zunehmen. So werden Animation und Visualisierung in virtuellen Umgebungen die Zusammenarbeit zwischen Kunstgeschichte, Kognitionspsychologie und Neurowissenschaften bei der Frage nach historischen Veränderungen der menschlichen Raumwahrnehmung und Raumvorstellung voranbringen. Die Max-Planck-Gesellschaft beabsichtigt, die Informationstechnologie in den Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaften durch institutsübergreifende Kooperationen unter Beteiligung der Institute für Informatik in Saarbrücken und Kaiserslautern zu nutzen und zu fördern.

Simone Santacaterina, Studio di Architettura Iarcsio Bratto



Digitale Rekonstruktion des Doms von Siena mit Sichtbarmachung der unterirdisch liegenden, zum Teil neu entdeckten Räume (4 und 5). 1 Piazza San Giovanni, 2 Via dei Fusari, 3 ehemaliges Oratorium San Giovannino, 6 Niveau des Domfußbodens.



Das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Gesellschaft ist spannungsreich. Wechselseitige Abhängigkeit schließt Konflikte nicht aus. Freie Forschung setzt gesellschaftliche Einrichtungen unter ständigen Änderungsdruck. Wie kommen Gesellschaften mit der Dynamik der modernen Wissenschaft zurecht? Nicht selten versuchen sie, Forschung zu beschränken oder auf bestimmte Ziele festzulegen. Aber sie riskieren damit die Leistungsfähigkeit und Vertrauenswürdigkeit der Wissenschaft. Auch in demokratischen Gesellschaften wissen die Bürgerinnen und Bürger oft wenig darüber, was neue wissenschaftliche Erkenntnisse für ihr Leben bedeuten könnten. Wie können Gesellschaften ihre Mitglieder so über Wissenschaft informieren, dass sie deren Chancen und Risiken realistisch einschätzen?

## WISSENSCHAFTSDYNAMIK UND GESELLSCHAFTSDYNAMIK

**Verflochten und abhängig: Wissenschaft und Gesellschaft**  
Wissenschaft ist eine Gesellschaft innerhalb der Gesellschaft. Sie hat ihre eigenen Normen, Hierarchien, Institutionen, Produkte, Belohnungen, Strafen und ihr eigenes Tempo. Die Wissenschaft ist eine strenge Hüterin ihrer Autonomie – als Vorbedingung für Freiheit und Gültigkeit der Forschung. Wissenschaft und Gesellschaft sind aber auch unauflöslich verflochten und voneinander abhängig. Eine Gesellschaft braucht eine reiche Vielfalt an Technologien und Antworten auf Fragen, wie die natürliche und menschliche Welt funktioniert. Dabei ist sie auf Wissenschaft angewiesen. Diese braucht Forschungsmittel und ein für wissbegierige Fragen und ungehinderte Untersuchungen günstiges Klima. Dabei ist sie auf die Gesellschaft angewiesen.

Wechselseitige Abhängigkeit führt nicht immer zu Harmonie. Das atemberaubende Tempo wissenschaftlicher Neuerungen verlangt von den Bürgern und politischen Führern moderner Staaten, dass sie Wertmaßstäbe und Institutionen reformieren, neu schaffen oder abschaffen, um die neuen Möglichkeiten integrieren oder ablehnen zu können – sei es Stammzellentherapie oder ein tieferes Verständnis der Entstehung von Krieg und Frieden. Umgekehrt wirken sich gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Prioritäten sowie Tabus auf die Richtung und Intensität wissenschaftlicher Forschung aus. Das geschieht nicht nur durch die Gesetzgebung, die eine wissenschaftliche Erforschung bestimmter Gegenstände einschränkt, oder durch Stiftungen, die manche wissenschaftlichen Projekte fördern, andere aber nicht. Beeinflusst wird dies auch durch die Ausbildung und Rekrutierung begabter junger Leute für wissenschaftliche Karrieren. Nur wenn die vielfachen, komplexen

Verflechtungen moderner Wissenschaften und moderner Gesellschaften bekannt sind, können sich beide zusammen weiterentwickeln.

Wissenschaft bietet viele Überraschungen, und ihre Geschichte ist vom 17. Jahrhundert an geprägt durch fruchtbare Instabilität. Fortschritte im Wissen sind nur durch Umwälzungen im Bereich der Begriffe wie der Empirie zu gewinnen. Forschung, die stillsteht, ist keine Forschung mehr. Und eine Wissenschaft, die ein und dasselbe Lehrbuch mehr als eine Studentengeneration lang benutzen kann, ist mit einiger Wahrscheinlichkeit im Niedergang begriffen. Auch die Gesellschaft entwickelt sich weiter: Aber ihre Dynamik ist fast zwangsläufig langsamer, besonders in Staatsformen, die auf Konsensbildung und institutioneller Kontinuität beruhen. Folglich verlaufen Wissenschafts- und Gesellschaftsdynamik selten synchron, auch wenn Wissenschaftspolitik das Ziel hat, beide aufeinander abzustimmen.

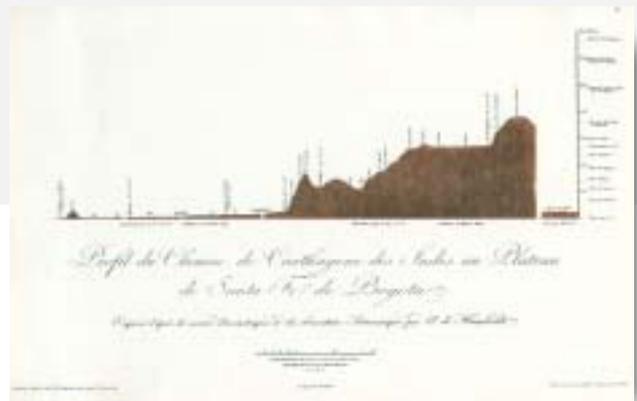
### **Innovative Wissenschaft kann Überzeugungen und Ordnungen untergraben**

Das derzeit anschaulichste Beispiel für die Auswirkung der sehr verschiedenen Rhythmen wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Dynamik ist die Biotechnik-Debatte. Aber sie ist nur das jüngste Glied in einer langen, bis zur Frühen Neuzeit zurückreichenden Kette solcher Debatten und Spannungen. Das Problem ist auch nicht auf moderne westliche Demokratien beschränkt. Absolute Monarchien, totalitäre Regime der extremen Rechten wie der extremen Linken und Dritte-Welt-Länder mussten und müssen mit den teilweise beunruhigenden Wirkungen innovativer Wissenschaft zurechtkommen, die Macht und neue Prosperität hervorbringen, zugleich jedoch lieb gewordene Über-

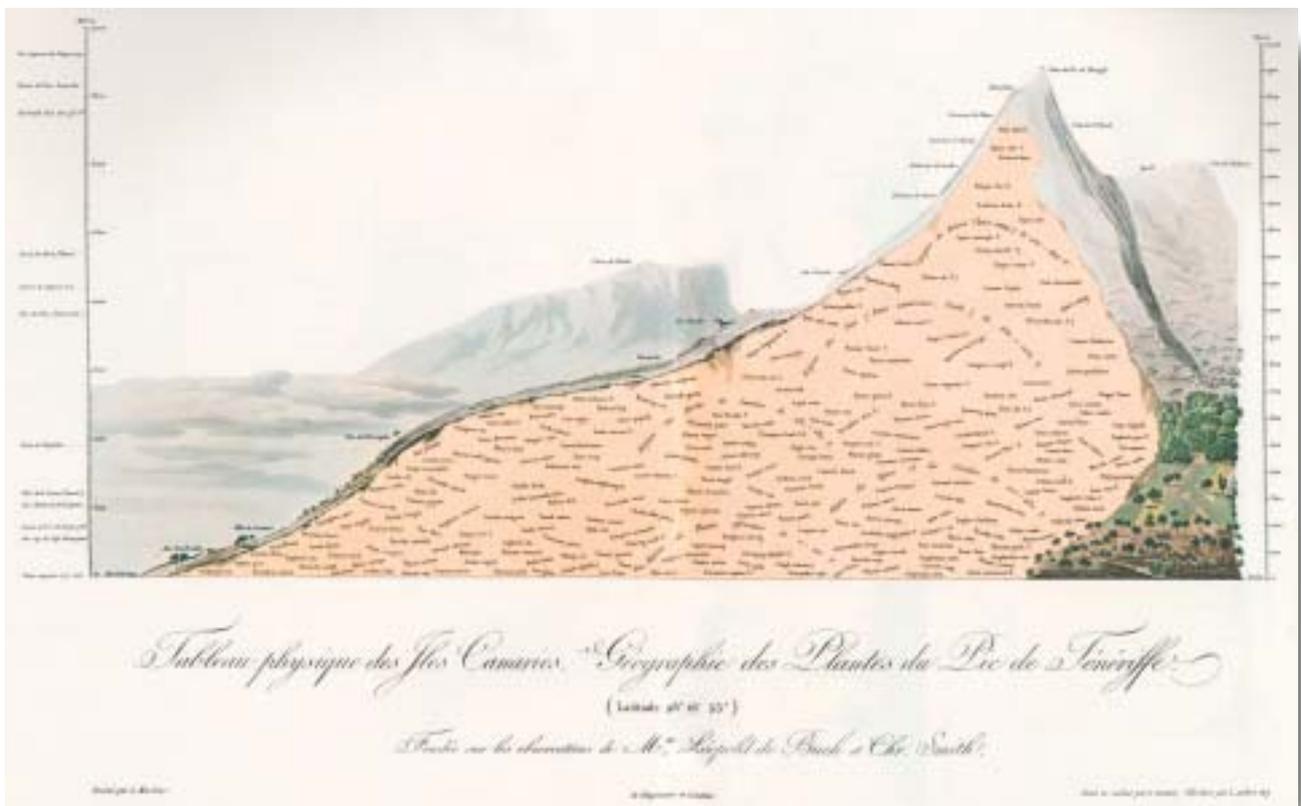
zeugungen und bewährte moralische Ordnungen untergraben können. Das ist selbst dann der Fall, wenn neue wissenschaftliche Entdeckungen im Bereich der Grundlagenforschung bleiben, ohne dass ihre Anwendbarkeit vorhersehbar wäre. Schulen und Universitäten müssen neues Wissen in ihre Lehrpläne aufnehmen und damit eine Kluft aufreißen, die den Kenntnisstand und die Überzeugungen der Elterngeneration trennt von dem, was ihre Kinder wissen und glauben. Der erste Teil des interdisziplinären Projekts zur Wissenschaftsdynamik und Gesellschaftsdynamik untersucht die Wechselwirkungen zwischen beschleunigt verlaufenden Veränderungen in der Wissenschaft und gesellschaftlichen Veränderungen in vergleichender Perspektive: Historische und kulturübergreifende Vergleiche helfen, wesentliche von zufälligen Faktoren zu unterscheiden und Verallgemeinerungen, die nur auf wenigen bekannten, aber nicht repräsentativen Beispielen beruhen, zu vermeiden.

Gesellschaften reagieren nicht einfach auf Forschungsergebnisse: Sie versuchen, Forschung zu kontrollieren. Noch nie hat eine Gesellschaft zügellose Wissbegier zugelassen. Wissenschaftliche Forschung wurde immer – aus ethischen, religiösen, ökonomischen und politischen Gründen – selektiv kanalisiert. Die neue beispiellose mili-

tärische und wirtschaftliche Bedeutung der Naturwissenschaften sowie die politische Bedeutung der Humanwissenschaften haben jedoch den Druck zur Beeinflussung der Wissenschaft durch Eingriffe von außen verstärkt. Manchmal gefährdet dieser äußere Druck zentrale wissenschaftliche Normen, so wenn die Veröffentlichung kommerziell oder militärisch prekärer Forschungsergebnisse ganz oder teilweise untersagt wird. Ein ähnlicher Einfluss von außen ist die Tendenz der vergangenen Jahrzehnte,



Das wissenschaftliche Bild: Alexander von Humboldts innovative Darstellung von Daten in seinem „ATLAS GEOGRAPHIQUE ET PHYSIQUE DES RÉGIONS ÉQUINOXIALES DU NOUVEAU CONTINENT“ (Paris, 1814).





#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Bonn
- MPI für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht, München
- MPI für Geschichte, Göttingen
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln
- MPI für Wissenschaftsgeschichte, Berlin
- Bibliotheca Hertziana – MPI für Kunstgeschichte, Rom

wissenschaftliche Arbeit zunehmend nach dem Vorbild kommerzieller Unternehmen zu organisieren: durch Einsatz einer großen, spezialisierten, geografisch weit verstreuten Zahl von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Dadurch ist es wie in der Industrie schwieriger geworden, Leitung auszuüben und Verantwortung klar zuzuordnen. Auch die zunehmende Finanzierung der Forschung durch private Geldgeber beeinflusst die wissenschaftliche Arbeitsweise und die Wahl der Untersuchungsgegenstände. Staatliche Aufsicht und Gesetzgebung regulieren nicht nur ethisch prekäre Forschungsgebiete (zum Beispiel Experimente an Menschen), sondern liefern auch die rechtliche Definition wissenschaftlicher Arbeit in Bezug auf andere Themen. An all diesen Fronten haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eingewendet, dass solche Entwicklungen die Autonomie und sogar die Vertrauenswürdigkeit der Wissenschaft gefährden. Der zweite Teil des Projekts Wissenschaftsdynamik und Gesellschaftsdynamik behandelt das Thema „Wissenschaft als separater Bereich“ – rechtlich, wirtschaftlich, politisch und intellektuell gesehen.

#### Öffentlichkeit muss Inhalte, Nutzen und Risiken abwägen können

In demokratischen Staatsordnungen bedeutet eine Wissensgesellschaft im Idealfall eine kenntnisreiche Bürgerschaft. Nicht nur über die finanzielle Förderung von Wissenschaft, sondern auch über die mögliche Erschütterung der gesellschaftlichen Ordnung durch wissenschaftliche Innovationen muss in öffentlichen Debatten entschieden werden sowie über die Aufteilung von Geldmitteln und Arbeitskräften auf verschiedene konkurrierende Forschungsbereiche. Dies impliziert eine informierte Öffentlichkeit, also eine, die nicht nur die Inhalte und möglichen Folgen

der zur Diskussion stehenden Forschung kennt, sondern auch Risiken und Nutzen gegeneinander abwägen kann. Außerdem sollte sie in der Lage sein, die Ungewissheiten einzuschätzen, die jedem progressiven Forschungsgebiet anhaften. Dabei ist das Verständnis von visuellen Daten – Bildern, Tabellen, Grafiken – oft mindestens so entscheidend wie das Auffassen von Texten. Weil die Wissenschaftslandschaft sich so schnell verändert, können Schulen und Universitäten die Aufgabe, eine Wissensgesellschaft heranzubilden, nicht allein erfüllen. Auch den Medien ist es nicht gelungen, den Bürgern kontinuierliche, leicht zugängliche Informationen über dringende wissenschaftliche Fragen zu bieten. Bis heute verstehen nur wenige Regierungen die Wissensvermittlung an die Bürgerschaft als einen Teil ihres Mandats, obwohl viel für die Politik davon abhängt. Deshalb ist die wissenschaftliche Fortbildung der Bürgerinnen und Bürger auch in hoch technisierten Gesellschaften erstaunlich planlos. Der dritte Teil des Projekts befasst sich mit den Fragen: Welche Art von Wissenschaft wird der Öffentlichkeit präsentiert, und wie wird sie in Wort und Bild von wem und zu welchem Ende dargestellt?

Gesamtziel des Projekts ist es, die Wechselwirkungen zwischen der Dynamik der Wissenschaft und der Dynamik der Gesellschaft in Vergangenheit und Gegenwart zu verstehen, um so Konvergenz- und Divergenzpunkte markieren zu können. Bis jetzt sind diese Wechselwirkungen in erster Linie hinsichtlich der Gefahren und Chancen einer auf Wissenschaft gründenden Technologie erforscht. Eine auf Wissenschaft gründende Gesellschaft ist aber mehr als eine auf Technologie basierende Gesellschaft. Es ist eine Gesellschaft, die im Kern auf Veränderungen ausgerichtet ist.

## THEORIE UND MODELLIERUNG

Die Natur- und Ingenieurwissenschaften erforschen die Grundlagen hoch komplexer Systeme sowie deren Bedeutung und Funktion für das Umfeld. Die folgenden Beiträge erläutern Systeme aus den Materialwissenschaften, Physik, Chemie, molekularer und organischer Biologie. Dabei lassen sich die beobachteten Phänomene oft nicht unmittelbar aus ersten Prinzipien erklären. Dies erfordert einerseits theoretische Neuerungen in der Grundlagenforschung, um der Bedeutung des komplexen Systems besser gerecht zu werden. Andererseits ermöglicht die Leistungsfähigkeit heutiger Computer, das Verhalten komplexer Systeme zu simulieren und so Simulation, Experiment und Theorie zum wech-

selseitigen Nutzen aufeinander zu beziehen. Die folgenden Beiträge entstammen ganz unterschiedlichen Disziplinen. Dennoch lässt sich eine erstaunliche Konvergenz der Fragestellungen und Methoden beobachten. Simulationen molekularer Systeme helfen, Reaktionen an Oberflächen von Katalysatoren zu verstehen, aber auch Struktur und Dynamik biologischer Makromoleküle zu modellieren. Methoden der Physik und der Ingenieurwissenschaften finden zunehmend Eingang in das Studium biologischer Prozesse. Die Evolutionstheorie versucht, biologische Systeme als Produkt eines historischen Optimierungsprozesses zu verstehen.



### NEUE FRONTEN DER THEORIE UND MODELLIERUNG

67



### BIOLOGISCHE NETZWERKE ALS KOMPLEXE SYSTEME

70



### SYSTEMTECHNIK UND GEKOPPELTE PROZESSE

72



### COMPUTATIONAL BIOLOGY ALS GEMEINSAME INITIATIVE DER CHINESISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UND DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

74

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND BIOLOGISCHE VIELFALT

NEUE MATERIALIEN PRÄGEN DIE ZEITALTER

INFORMATION: TECHNIK, LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN EINER GLOBALEN WELT

MÄRKTE UND INSTITUTIONEN



Computergestützte Modellierung nimmt in der modernen naturwissenschaftlichen Forschung einen immer breiteren Raum ein. In diesem Beitrag wird die Entwicklung der vergangenen Jahre anhand von Beispielen kurz skizziert und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben. Die aktuellen Forschungsthemen reichen von der Theoretischen Chemie über unterschiedliche Bereiche der Physik der kondensierten Materie und der Biophysik bis zu turbulenten Plasmen und neuen Aspekten in der Bioinformatik.

## NEUE FRONTEN DER THEORIE UND MODELLIERUNG

### Computersimulation schlägt Brücke zwischen Theorie und Experiment

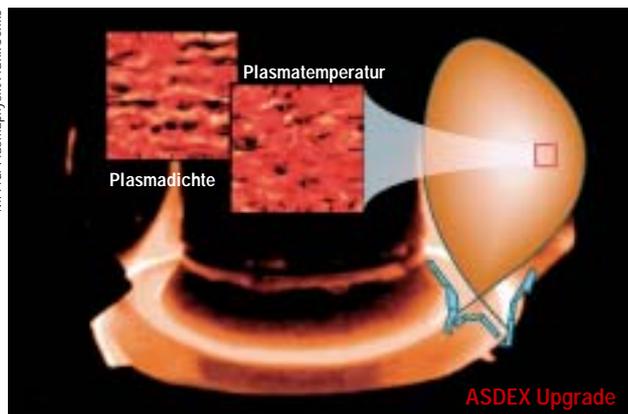
Ob nun die untersuchten Systeme immer größer oder immer kleiner werden, die auftretenden Fragestellungen werden jedenfalls immer komplexer. Auf diesen Nenner lässt sich im Wesentlichen die Entwicklung der theoretischen Untersuchungen in den Naturwissenschaften und ihren (ingenieurwissenschaftlichen) Nachbardisziplinen bringen. Das hat zur Folge, dass sich die Schere zwischen der theoretischen Beschreibung der Natur, die auf einer mathematischen Problemformulierung und Lösung basiert, und aktuellen experimentellen Fragestellungen immer weiter öffnet. Trotzdem sind grundlegende Theorien für unser Verständnis unabdingbar. Sie beinhalten oft neue Vorstellungen, die ein Forschungsgebiet einen großen Schritt voran bringen. Die Konsequenzen für die Behandlung spezifischer wissenschaftlicher oder technischer Fragestellungen und deren Einbindung in eine Systemumgebung verlieren dadurch aber nichts von ihrer Komplexität.

Um sowohl eine Brücke zum Experiment als auch zum Verständnis der Anwendbarkeit spezieller Theorien zu schlagen, hat sich im Laufe der Jahre die Computermodellierung als eigenständige Disziplin in den Naturwissenschaften entwickelt. Auf verschiedenen Ebenen ist die Computersimulation ein fester Bestandteil der Forschung und profitiert von der rapiden Entwicklung der Hardware, der Modellierungsmethoden und der Algorithmen (Software).

### Molekulare Strukturen und chemische Reaktionen

Die Computersimulation einzelner großer oder vieler kleiner Moleküle erlaubt es, komplizierte Vorgänge, an denen (sehr) viele Atome gleichzeitig beteiligt sind, mit atomarer Auflösung zu beobachten und zu analysieren. Die Verfahren dazu wurden in den zurückliegenden Jahren an verschiedenen Max-Planck-Instituten immer weiter entwickelt und optimiert. Beispiele sind die Simulation großer Biomoleküle mit einer Wasserhülle oder das Studium der Diffusion kleiner Moleküle in einer Polymermatrix. Die Modellparameter wurden entweder durch den Vergleich mit Experimenten oder über quantenchemische Rechnungen gewonnen. Da bei diesen Simulationen keine quantenmechanischen Effekte wie Veränderungen der elektronischen Struktur durch chemische Bindungen oder Anregungen berücksichtigt werden, sind sie beispielsweise nicht direkt auf chemische Reaktionen anwendbar. Das änderte sich mit der Entwicklung von neuartigen Hybridverfahren, die auf quantenmechanischer Dichtefunktionaltheorie – kombiniert mit klassischen

MPI für Plasmaphysik/Frank Jenko



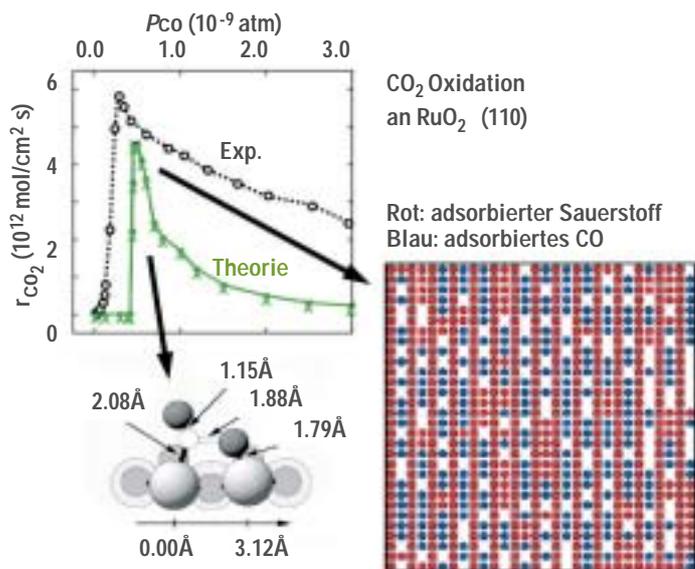
Ergebnis einer dreidimensionalen kinetischen Turbulenz-Simulation für einen Ausschnitt aus einem Tokamakplasma (ca.  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  in der Ebene senkrecht zu den Magnetfeldlinien).

Simulationsverfahren – fußen. Damit ist es etwa möglich, chemische Reaktionen auf dem Rechner zu verfolgen, Reaktionspfade zu identifizieren und Katalyseprozesse zu studieren. (Abb. unten).

Erstmals sind die Forscher und Forscherinnen damit in der Lage, Katalysatoren zu entwickeln und zu optimieren. Ähnliches gilt für die Modellierung enzymatischer Reaktionen, ein lange gehegter Wunsch der Theoretischen Chemie. Oft sind zur vollständigen Modellierung sehr große Systeme und/oder große Zeitbereiche notwendig. Um die zunehmende Komplexität, das statistische Zusammenspiel und die oft sehr verschiedenen physikalischen Zeitskalen der einzelnen Prozesse angemessen zu behandeln, müssen weitere neuartige, skalenübergreifende Verfahren entwickelt werden. Im Rahmen von Hybrid- und Multiskalenverfahren werden an mehreren Max-Planck-Instituten Methoden entwickelt, die einen systematischen Übergang vom quantenmechanischen zum mikroskopischen, atomar aufgelösten und mesoskopischen bis hin zum makroskopischen Niveau ermöglichen.

#### Mesoskopische Modelle und Makrowelt

Oft ist es trotz optimierter Modelle, Algorithmen und immer besser werdender Computer nicht möglich oder nicht sinnvoll, Modelle mit vielen Details zu betrachten. Allgemeine, generische Eigenschaften können für sehr unterschiedliche Systeme gleich sein. Es ist daher oft essenziell,



Fritz-Haber-Institut der MPG/Karsten Reuter

ein möglichst einfaches Modell zu wählen, das genau auf diese universellen Eigenschaften zielt. In der Theoretischen Physik stellten das Ising-Modell für den Ferromagnetismus und die nachfolgenden Varianten ein beeindruckendes Beispiel für die Leistungsfähigkeit solcher modellbasierten Vereinfachungen dar. Mit ihnen haben ganze Generationen von Wissenschaftlern gearbeitet und wesentliche Impulse für viele Gebiete, insbesondere der Physik und Chemie der Phasenübergänge etwa bei Entmischungsvorgängen in Legierungen gegeben. Bei synthetischen oder biologischen Polymeren ist es oft sinnvoll und fast immer notwendig, an vereinfachten Modellen selbst technisch relevante Eigenschaften zu untersuchen.

Durch eine geeignete Verbindung solcher Modelle mit detaillierten molekularen Strukturen und quantenchemischen Rechnungen können beispielsweise Morphologien an einer Grenzfläche wie der Oberfläche eines CD-Stempels vorhergesagt werden (Abb. S. 69). Nur die Verbindung unterschiedlicher Betrachtungsweisen ermöglicht solche Ergebnisse. Auf größeren Skalen sind „Flüssigkeitseigenschaften“ von besonderem Interesse. Eine der großen Herausforderungen der Physik und damit auch der Modellierung ist das Verständnis der Turbulenz: Sie kann sowohl sehr störend sein, während sie andererseits für das Durchmischen von Flüssigkeiten notwendig ist. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob turbulente Strömungen bei Raumtemperatur im Wasser, im Plasma bei vielen Millionen Grad Kelvin oder in der Astrophysik für Systeme mit vielen Lichtjahren Durchmesser betrachtet werden. Im Falle von Fusionsplasmen helfen Simulationen entscheidende Fortschritte bei der Verbesserung von Fusionsexperimenten zu erzielen (Abb. S. 67).

#### Auf dem Weg zur Systemsimulation

Die beschriebenen Beispiele stellen spezifische Phänomene dar. Künftig wird die Computermodellierung zunehmend ein direkter Partner des Experiments werden, sodass sich völlig neue Möglichkeiten der experimentellen Analyse eröffnen. Gerade im Bereich der nanoskopisch strukturierten Funktionsmaterialien wie hierarchisch organisierte Aggregate oder Proteine sind neuartige Methoden und Verfahren zu erwarten. Damit kommen die Forscherinnen und Forscher der Simulation ganzer Systeme einen entscheidenden Schritt näher. Wichtige Beispiele aus der theoretischen Biologie sind die Modellierung interzellulärer Vorgänge im Sinne der Systembiologie oder die Simulation des Zusammenwirkens verschiedener Hirnregionen.

Neben dem Input durch die klassischen Naturwissenschaften spielen in diesem Bereich zunehmend Methoden aus der Informatik und den theoretisch ausgerichteten Inge-



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Astrophysik, Garching
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf
- MPI für extraterrestrische Physik, Garching
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für Metallforschung, Stuttgart
- MPI für Plasmaphysik, Garching und Greifswald
- MPI für Polymerforschung, Mainz
- MPI für Quantenoptik, Garching
- Fritz-Haber-Institut der MPG, Berlin

neurwissenschaften eine Rolle. Die vielfältigen Parameter werfen neue Probleme in der Datenanalyse auf. Wichtig wäre etwa eine grafische Darstellung eines komplexen Problems und der Resultate, die die Abhängigkeit von vielen Parametern klar strukturiert und abbildet.

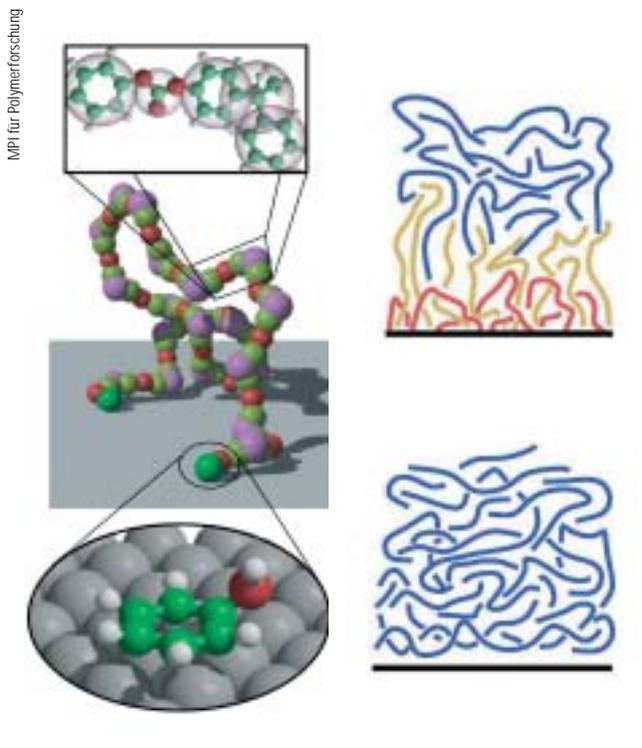


Illustration der Kombination verschiedener Ebenen der Modellbildung bei Polymeren und der durch solche Simulationen vorhergesagten unterschiedlichen Morphologie einer Polymerschmelze auf einer Metalloberfläche in Abhängigkeit von der chemischen Struktur der Kettenenden.

Die Bedeutung der Modellierung nimmt weiter zu. Heute werden mit PCs Rechnungen durchgeführt, für die noch vor wenigen Jahren Großrechner notwendig waren. Für die kommenden Herausforderungen werden international große Anstrengungen unternommen, erstklassige Hardware zur Verfügung zu stellen sowie Zentren aufzubauen, die sich mit solchen Fragen beschäftigen. Während in den Anfangszeiten Computersimulationen von ganz einfachen Modellsystemen im Vordergrund standen, können inzwischen experimentelle Ergebnisse reproduziert und Eigenschaften vorhergesagt werden, für die es in ihrer Gesamtheit keine analytisch theoretischen Vorhersagen mehr gibt.

Damit hat die Modellierung den Schritt von der Überprüfung einzelner Details zur Vorhersage komplexer Material- oder Systemeigenschaften gemacht. Sie wird mit dieser Entwicklung künftig ganz wesentlich an Bedeutung gewinnen. Zusätzlich können wegen der gestiegenen Rechenleistung mittlerweile sehr viele Modell- und Parametervarianten abgetestet werden, ohne aufwändige und in einigen Fällen auch gefährliche Experimente durchzuführen. Damit trägt die Modellierung nicht nur zu ihrer eigentlichen Aufgabe, dem Erkenntnisgewinn, bei, sondern auch ganz wesentlich zur Effizienzsteigerung in der Forschung. Zu diesen Zwecken betreibt die Max-Planck-Gesellschaft neben Computern der mittleren Leistungsklasse in den Instituten das Rechenzentrum in Garching. Dort wird der Bedarf für Spitzenanforderungen soweit als möglich abgedeckt.

Die Interaktionen der Bausteine einer Zelle, vor allem der Gene und Proteine, stellen komplexe Netzwerke dar. Die Forschung versucht zu verstehen, wie deren Evolution und Funktion sich in ihrer Architektur widerspiegelt. Dies geschieht einerseits auf der Ebene der statistischen Beschreibung der Netzwerke, andererseits durch Modellierung und Simulation der Eigenschaften eines Netzwerkes. Letzteres ist Gegenstand der Systembiologie, die die theoretische Analyse mit dem Experiment verbindet.

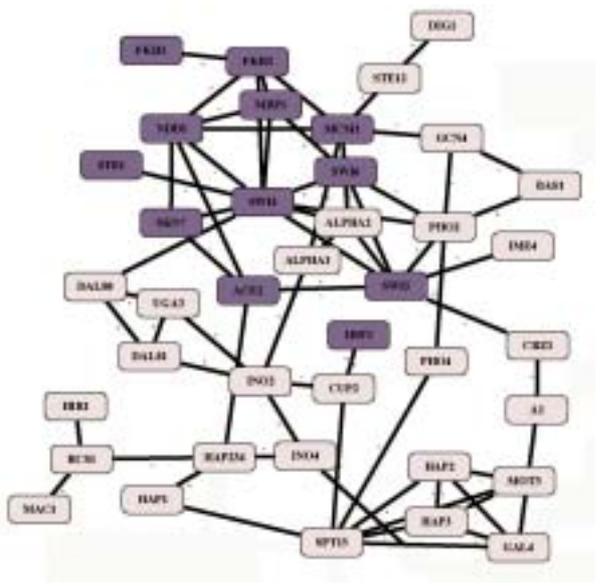
## BIOLOGISCHE NETZWERKE ALS KOMPLEXE SYSTEME

**Im Mittelpunkt: Komplexität und Funktion des Genoms**  
50 Jahre ist es her, dass James Watson und Francis Crick ein Modell für die Struktur der DNA vorgestellt haben – und dabei gleichzeitig den grundlegenden Mechanismus zur Weitergabe der Erbinformation aufdeckten. Das Wissen um die Funktionsweise der Zelle wächst seitdem ständig an. Inzwischen wurden nicht nur die kompletten Genome einer Vielzahl von Organismen bestimmt, auch das Wissen über die Beziehungen zwischen den einzelnen Genen nimmt rapide zu. Die Komplexität des Systems Organismus mit seinen überschaubaren Einzelgenen erfüllt die Forscherinnen und Forscher immer wieder mit Staunen.

Inzwischen ist jedoch klar, dass ein Organismus nicht nur über seinen Satz an Genen definiert wird. Bei identischer Genausstattung ist in den verschiedenen Zellen eines Organismus immer nur ein – jeweils unterschiedlicher – Teil der Gene aktiv. Die DNA enthält neben den Proteinkodierenden Bereichen der Gene auch so genannte regulatorische Regionen. Dort greifen wiederum andere Proteine an, die bestimmen, zu welcher Zeit und an welchem Ort ein Gen aktiv werden soll. Die tatsächliche Menge der auf der DNA kodierten Informationen geht somit weit über die Anzahl der Gene hinaus. Zwar sind die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen inzwischen mit Hilfe der DNA-Chip-Technologie in der Lage, die jeweils aktivierten Gene, das so genannte Expressionsmuster, zu bestimmen. Doch die Steuerungsmechanismen des Genoms, also die Anweisungen zur Aktivierung und Deaktivierung von Genen, sind noch weitgehend unbekannt. Das wissenschaftliche Interesse richtet sich heute zunehmend auf die Komplexität und Funktion des gesamten Genoms. Die Erforschung der Mechanismen, die zu bestimmten Zeitpunkten in bestimmten Zellen eine Aktivierung einzelner Gene bewirken, ist dabei von hohem Interesse.

Diese Überlegungen zeigen, dass Gene Teil eines komplizierten Netzwerkes von Interaktionen sind. Netzwerke dieser Art sind im Organismus von zentraler Bedeutung. So bilden beispielsweise die wechselwirkenden Proteine eines Organismus ein höchst komplexes Netzwerk, das die Basis für den Informationsfluss in der lebenden Zelle bildet. Diese Zusammenhänge werden heute in so genannten Wechselwirkungskarten dargestellt und ermöglichen nicht nur wichtige Einblicke in die Funktion der Proteine. Die Karten erlauben es auch, allgemeine Eigenschaften des betreffenden Netzwerkes zu untersuchen.

MPI für molekulare Genetik/Thomas Manke



Im Netzwerk sind die Proteinpaare verbunden, wenn sie die regulatorischen Regionen auf der DNA bevorzugt zusammenbinden. Alle rot dargestellten Proteine sind bekannte Kontrollelemente des Zellzyklus.

### Biologische Netzwerke sind robust und flexibel

Eine typische Eigenschaft von Netzwerken ist die Robustheit des jeweiligen Systems. Das komplizierte Regulationsnetzwerk der Gene liegt allen Lebensprozessen zu Grunde. Dieses Netzwerk gilt als robust, wenn gewisse Störungen seiner Komponenten oder Verbindungen seine Funktion nicht völlig zunichte machen. Zudem sind biologische Netzwerke flexibel, sodass Zellen auf ständig wechselnde Lebensbedingungen geeignet reagieren können. Ein Markenzeichen flexibler Netzwerke ist deren Modularität, die man experimentell in Form von Proteinkomplexen beobachtet. Ist es die Strategie der Evolution, bestimmte Funktionen über komplexe Netzwerke zu erfüllen und sie dadurch unanfälliger gegenüber Störungen zu machen? Fragen dieser Art drängen sich beim Studium komplexer Lebensprozesse auf. An deren Beantwortung arbeiten Physiker, Ingenieure und Biologen intensiv und gemeinsam.

In den vergangenen Jahren hat sich die Erkenntnis herauskristallisiert, dass viele Netzwerke gemeinsame Eigenschaften besitzen. So zeigt der Vergleich des Internets mit dem beschriebenen Netzwerk der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Proteinen, dass beide ähnliche statistische Eigenschaften aufweisen. In beiden Fällen haben wenige Netzwerkknoten viele Nachbarn, während eine große Anzahl von Knoten wenige Nachbarn hat. Dies führt dazu, dass zwischen zwei beliebigen Knoten stets mehrere, zu meist relativ kurze Wege existieren. Im Internet dient diese Eigenschaft der Übertragungssicherheit: Bei Ausfall eines Computers findet eine Nachricht einen anderen Weg, um ihr Ziel zu erreichen.

### Theoretische Modelle für biologische Systeme und ihr Verhalten

Lässt sich eine solche Erklärung auf biologische Netzwerke übertragen? Sicher können ähnliche Begründungen wie die Übertragungssicherheit im Falle des Internets konstruiert werden. Letztlich stellen solche Annahmen jedoch nur Arbeitshypothesen dar, welche exakt formuliert und bewiesen werden müssen. Hierin besteht eine große Herausforderung an die heutige Biologie. Es sind Wege nötig, um Annahmen über Netzwerkeigenschaften und ihre biologische Rolle im Experiment überprüfen zu können. Es handelt sich jedoch um sehr allgemeine Aussagen, die oft nur mit Blick auf die Evolution sinnvoll erscheinen – ihre experimentelle Validierung ist daher keine leichte Aufgabe.

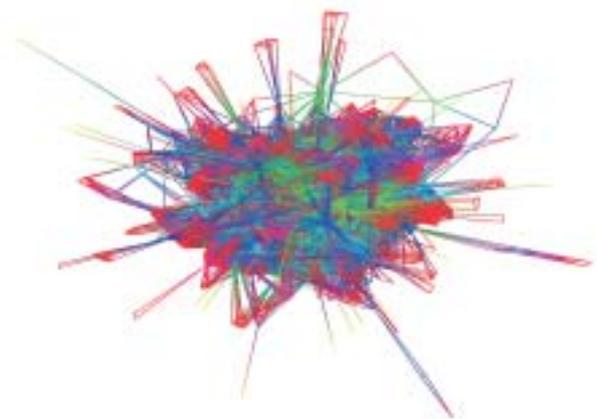
Während die Netzwerkanalyse die Daten gleichsam aus der Vogelperspektive betrachtet, bedarf es gleichzeitig auch der detaillierten Beschreibung und mathematischen Modellierung einzelner Zusammenhänge. Das neue Forschungsgebiet der Systembiologie versucht, auf der Grundlage vorhandener Daten theoretische Modelle für biologische Systeme

### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für Physik komplexer Systeme, Dresden

und ihr Verhalten zu erstellen. Die Ergebnisse der Vorhersagen werden experimentell getestet, um damit Anhaltspunkte für die Verfeinerung des Modells zu erhalten. Das mit diesem Vorgehen entstehende Verständnis der Systemeigenschaften biologischer Prozesse – sowohl im Globalen als auch im Detail – hat große Auswirkungen auf die medizinische Forschung: Denn je klarer es ist, welche Prozesse von einer Krankheit betroffen sind, desto zielgerichteter können therapeutische Eingriffe entwickelt werden.

Verschiedene Max-Planck-Institute befassen sich heute mit komplexen Systemen und deren Eigenschaften. Mehrere Institute der Biologisch-Medizinischen Sektion (BMS) arbeiten in Richtung Systembiologie. Das Verständnis der komplexen biologischen Prozesse stellt jedoch eine Herausforderung an die Gesamtheit der Naturwissenschaften dar. Die spannendsten Resultate sind durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zu erzielen, bei der insbesondere Physiker, Ingenieure und Biologen einander ergänzen können. Intensive Kontakte zwischen den biomedizinischen Instituten und der Chemisch-Physikalisch-Technischen Sektion (CPTS) sind erforderlich, um zu neuen Durchbrüchen zu gelangen.



Zwei Proteine eines Hefe-Proteomes sind in dieser Grafik verbunden, wenn zwischen ihnen eine physikalische Wechselwirkung experimentell festgestellt wurde. Eine Organisation auf höherer Ebene erscheint als Netzwerk von vielen dichten (roten) Assoziationen.

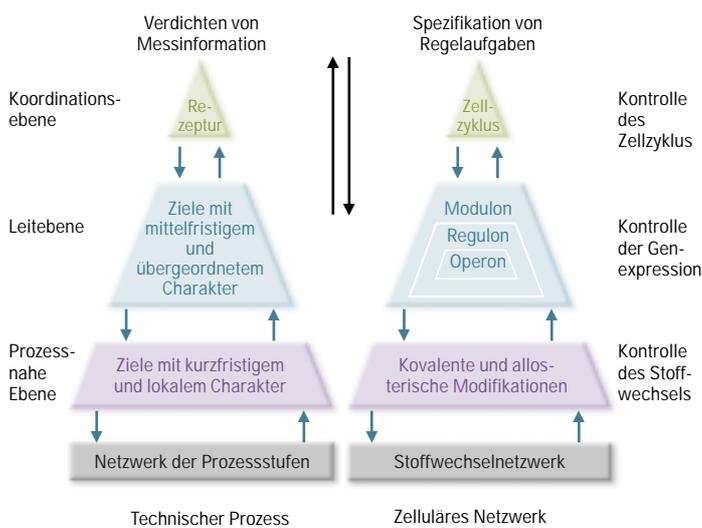
Natur- und Ingenieurwissenschaften beschäftigen sich zunehmend mit Systemen, die durch eine enge Verkopplung und Vernetzung von Einzelprozessen gekennzeichnet sind. Beispiele reichen vom Design moderner Industrieanlagen bis hin zur Analyse globaler Stoffkreisläufe oder biologischer Systeme. Meist gilt: Das Verhalten des Gesamtsystems lässt sich weder qualitativ noch quantitativ durch die Betrachtung isolierter Teile ausreichend verstehen. Ein wesentliches Ziel der Systemtechnik und ihrer methodischen Grundlage, der Systemtheorie, besteht deshalb in der Entwicklung von Analyse- und Entwurfsverfahren, die eine Behandlung dieser Gesamtsysteme ermöglichen. Dabei wird ein Ansatz gewählt, der durch eine mathematische Beschreibung weitgehend vom konkreten Anwendungshintergrund abstrahiert und damit die Analyse unterschiedlichster Prozesse mit den gleichen Werkzeugen ermöglicht. Der zu erwartende gesellschaftliche Nutzen ist offensichtlich: So führt ein effizienterer Betrieb moderner Produktionsanlagen zu enormen ökologischen und volkswirtschaftlichen Vorteilen. Die Folgen anthropogener Eingriffe auf das Weltklima können besser eingeschätzt oder die Aufklärung von bisher nicht therapierbaren Krankheiten vorangetrieben und neue Medikamente entwickelt und kostengünstig hergestellt werden.

## SYSTEMTECHNIK UND GEKOPPELTE PROZESSE

### Komplexität des Lebens als Herausforderung

Natur- und Ingenieurwissenschaften beschäftigen sich zunehmend mit Systemen, die durch eine enge Verkopplung und hochgradige Vernetzung von Einzelprozessen gekennzeichnet sind. Beispielsweise wird bei modernen Industrieanlagen steigenden Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit durch verstärkte stoffliche und energetische Vernetzung Rechnung getragen. Dies ermöglicht sowohl die effizientere Nutzung von Energie als auch eine Reduzierung der eingesetzten Rohstoffe. Vergleichbare Phänomene sind auch in anderen Bereichen zu beobachten:

So basiert das Verständnis globaler Stoffkreisläufe auf der detaillierten Beschreibung der Dynamik zahlreicher, eng miteinander gekoppelter Prozesse. Diese reichen von anthropogenen Eingriffen in die natürlichen Kreisläufe und der Biologie der Organismen bis hin zu chemisch-physikalischen Änderungen in Geosphäre und Atmosphäre. Eine der größten Herausforderungen stellt schließlich das Verständnis der enormen Komplexität des Lebens dar. Selbst bei einfachsten Bakterien gibt es viele ineinander greifende und teilweise äußerst komplex geregelte Vorgänge. Diese ermöglichen einen störungsfreien Ablauf des Stoffwechsels unter sich ständig ändernden Umweltbedingungen oder dienen der genauen zeitlichen Kontrolle von Genreplikation und Zellteilung und stellen damit die Erhaltung der Art sicher.



MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme/Ernst-Dieter Gilles

Gliederung technischer und biologischer Systeme: Mit steigender Hierarchieebene nimmt der Gehalt an Information zu, während immer weniger Details zur Erfüllung der Regelungsaufgabe notwendig sind.

### Verkopplung zieht chaotisches Verhalten nach sich

Das Verhalten solcher Systeme gekoppelter Teilprozesse ist naturgemäß sehr viel komplexer als das Verhalten einzelner Teilprozesse und deshalb weitaus schwieriger zu analysieren: Das Gesamtsystem lässt sich im Allgemeinen weder qualitativ noch quantitativ durch eine Betrachtung isolierter Teilprozesse verstehen. Oft wird beispielsweise durch die Verkopplung einiger weniger sehr einfacher Komponenten bereits ein chaotisches Verhalten des Gesamtsystems beobachtet. Andererseits scheitert die Anwendung bekannter Analysemethoden oft an der schieren Komplexität vieler durch Verkopplung entstandener realer Systeme. Bei der Analyse großer Systeme sind die Forscherinnen und Forscher deshalb bisher meist auf die Einbeziehung von Heuristiken angewiesen. Dabei muss dann oft eine drastische Einschränkung der Aussagekraft hingenommen werden. Dies gilt in verstärktem Maße auch für das duale Problem der

Analyse – die Aufgabe, das Verhalten von Systemen durch Entwurf geeigneter Steuerungen und Regelungen gezielt zu beeinflussen. Derzeit bekannte Entwurfsverfahren lassen sich nur auf vergleichsweise kleine Systeme anwenden. Eine isolierte Behandlung einzelner Teilprozesse in einem stark gekoppelten System führt aber in aller Regel zu äußerst unbefriedigenden und suboptimalen Ergebnissen.

### Analyse- und Entwurfsverfahren für komplexe Systeme

Ein wesentliches Ziel der Systemtechnik und ihrer methodischen Grundlage, der Systemtheorie, besteht in der Entwicklung von formalen Analyse- und Entwurfsverfahren, die auf stark gekoppelte und deshalb sehr komplexe Systeme anwendbar sind. Bei der Verfolgung dieses Ziels wird ein Ansatz gewählt, der durch eine mathematische Modellierung weitgehend vom konkreten Anwendungshintergrund abstrahiert und das betrachtete Analyse- bzw. Entwurfsproblem in eine formal-mathematische Beschreibung übersetzt. Eine solche Vorgehensweise besitzt eine Reihe von Vorteilen:

- Sie ist sehr ökonomisch, da mit einem einheitlichen Instrumentarium von Analyse- und Entwurfsmethoden potenziell viele Anwendungsprobleme gelöst werden können.
- Sie ermöglicht das Erkennen struktureller Gemeinsamkeiten in verschiedenen Bereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften und führt so zu Synergieeffekten zwischen diesen Bereichen.
- Der abstrahierende Ansatz erlaubt einen Brückenschlag zu nichttechnischen Wissenschaften wie Biologie und Medizin. So besteht etwa eine unmittelbare Verbindung zur sich neu etablierenden Disziplin Systembiologie, die auf eine quantitative Beschreibung und mathematische Modellierung zellulärer Systeme abzielt.

Die erfolgreiche Durchführung eines solchen im Kern interdisziplinären Ansatzes bedingt eine enge Zusammenarbeit von Vertretern und Vertreterinnen der Ingenieur- und Naturwissenschaften wie Prozessingenieuren, Biotechnologen und Biologen, mit Systemtheoretikern und Regelungstechnikern sowie Informatikern und Mathematikern. Solch eine traditionelle Fachgrenzen überbrückende Zusammenarbeit hat sich in den vergangenen Jahren an verschiedenen Max-Planck-Instituten etabliert.

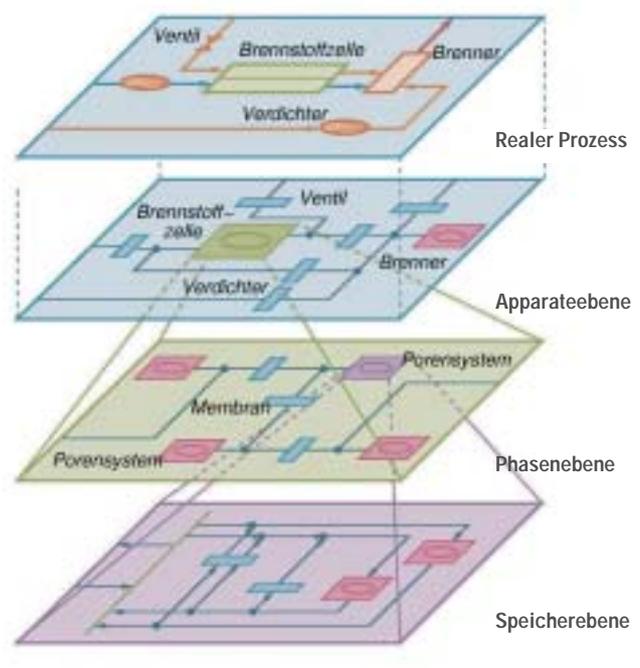
### Zusammenarbeit führt zu effizienteren Ergebnissen

Der zu erwartende gesellschaftliche Nutzen ist offensichtlich: So führt ein effizienterer Betrieb großer Produktionsanlagen zur Erzeugung von Energie mit modernsten Gaskraftwerken oder der Einsatz neuer, leistungsfähiger Brennstoffzellen zu enormen ökologischen, betriebs- und volkswirtschaftlichen Vorteilen. In Biotechnologie und Biowissenschaften dagegen entwickeln sich wegen der ra-

### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für Biogeochemie, Jena
- MPI für Chemie, Mainz
- MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Mathematik, Bonn
- MPI für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig
- MPI für Meteorologie, Hamburg
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für Physik komplexer Systeme, Dresden

santen Fortschritte in der biologisch-medizinischen Grundlagenforschung, der enorm gestiegenen Leistungsfähigkeit moderner Verfahren zur Analyse des Genoms und der Genexpression sowie des Einsatzes leistungsfähiger Computer Möglichkeiten, die Funktion ganzer biologischer Systeme einschließlich des Gehirns besser zu verstehen. Aber auch die Aufklärung von bisher nicht therapierbaren Krankheiten kann vorangetrieben, neue Medikamente können entwickelt und kostengünstig hergestellt werden. Diese fast beliebig verlängerbare Liste unterstreicht sowohl die Notwendigkeit als auch das Potenzial einer systemwissenschaftlich fundierten Behandlung komplexer gekoppelter Prozesse.



Hierarchische Strukturierung eines Prozessmodells für ein Brennstoffzellen-System: Es gibt unterschiedliche Ebenen, die eine übersichtliche und flexible Darstellung der Verknüpfung verschiedener Prozessmodule erlauben und Computersimulationen erleichtern.

Die rechnergestützte theoretische Biologie, Computational Biology, hat in den vergangenen Jahren eine wichtige Rolle in den Lebenswissenschaften eingenommen. Von der zunehmenden theoretischen Durchdringung der Biologie werden neue, entscheidende Anstöße für die biomedizinischen Fächer erwartet. Um diese Entwicklung zu fördern, haben die Chinesische Akademie der Wissenschaften und die Max-Planck-Gesellschaft die Gründung eines gemeinsamen Institutes in Shanghai beschlossen, das sich der theoretischen Biologie (Computational Biology) widmen soll.

## COMPUTATIONAL BIOLOGY ALS GEMEINSAME INITIATIVE DER CHINESISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UND DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

### Computational Biology spielt eine wichtige Rolle in den Lebenswissenschaften

Wie die Beiträge des vorliegenden Bandes zeigen, nehmen die mathematischen Wissenschaften eine zunehmend wichtigere Rolle innerhalb der Biologie und der Lebenswissenschaften ein. Die Informatik gehört inzwischen in Form der Bioinformatik zum Alltag der Molekularbiologie. Ohne Bioinformatik gäbe es keine Genomsequenzierung, und die modernen diagnostischen Methoden, die auf DNA-Chip-Technologie basieren, wären undenkbar. Zudem gibt es große Mengen von Messwerten über Zustände von Zellen und über die Beziehungen der einzelnen Biomoleküle untereinander. Dies führte zu einem Erstarken der traditionellen theoretischen und mathematischen Biologie, die biologische Prozesse mit formalen Methoden zu modellieren versucht. Anhand der existierenden und weiter zu bestimmenden Daten sollen die Modelle kalibriert, getestet und sukzessive verfeinert werden.

Eine moderne, große Forschungsorganisation muss dieser Entwicklung Rechnung tragen. Dies gilt sowohl für die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) als auch für die Max-Planck-Gesellschaft, die beide in den Biowissenschaften und Formalwissenschaften gut aufgestellt sind. Insbesondere ist die Chinesische Akademie der Wissenschaften für die Max-Planck-Gesellschaft die zentrale Partnerorganisation, mit der sie schon in den vergangenen 30 Jahren eine Kooperationsbeziehung auf hohem Niveau aufgebaut hat. Diese Verbindung bildet nun die Grundlage für die Max-Planck-Gesellschaft, sich aktiv an dem sich dynamisch entwickelnden Forschungsstandort China zu beteiligen. Die Chinesische Akademie der Wis-

enschaften und die Max-Planck-Gesellschaft haben die Gründung eines gemeinsamen Institutes, des CAS-MPG Partner Institute for Computational Biology, beschlossen.

Das neue Institut wird in verschiedener Hinsicht bahnbrechend sein: Mit dem Thema Computational Biology widmet es sich einem hochaktuellen Gebiet. Es wird von den beiden Organisationen wissenschaftlich gemeinsam verantwortet und soll die schon in den Nachwuchs- und Partnergruppen, die die Max-Planck-Gesellschaft und die Chinesische Akademie der Wissenschaften in China unterhalten, begonnene Tradition wesentlich weiterentwickeln. Obwohl das neue Institut in China an die CAS angebunden ist, soll es strukturell einem Max-Planck-Institut gleichen. Dies bedeutet, dass es unter der kollegialen Leitung mehrerer Direktoren stehen soll, dass Berufungen international ausgeschrieben werden und dass die Arbeit des Instituts regelmäßig durch einen mit international anerkannten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern besetzten Fachbeirat beurteilt werden soll. Das Partnerinstitut wird in seiner fünfjährigen Aufbauphase durch Projektmittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die CAS trägt die Hauptlast der Finanzierung.

Shanghai bietet sich als Standort für diese Institutsgründung aus verschiedenen Gründen an. Es befinden sich dort die Shanghai Institutes for Biological Sciences (SIBS) der Chinesischen Akademie der Wissenschaften. Die SIBS-Institute bilden ein multi- und interdisziplinäres Forschungszentrum, das insbesondere im experimentellen Bereich der Lebenswissenschaften Forschungsleistungen



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für Biophysik, Frankfurt/Main
- MPI für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Mathematik in den Naturwissenschaften, Leipzig
- MPI für molekulare Genetik, Berlin

bündelt und hohe Ansprüche an Qualität und Originalität stellt. Dort sind auch mehrere Max-Planck-Partnergruppen tätig. Zudem befindet sich in Shanghai auch das auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft und der CAS eingerichtete Shanghai Institute for Advanced Studies. In solch einem Umfeld stellt ein theoretisch ausgerichtetes Institut einerseits eine wesentliche Bereicherung dar, andererseits profitiert dieses selbst von der hervorragenden experimentellen Umgebung.

Am CAS-MPG Partner Institute for Computational Biology sollen bis zu drei Abteilungen und mehrere Selbständige Nachwuchsgruppen tätig sein. Gleichzeitig mit ihrer Berufung an das CAS-MPG Partnerinstitut sollen die Direktoren der Abteilungen zu Auswärtigen Wissenschaftlichen Mitgliedern an wissenschaftlich nahe stehenden Instituten der Max-Planck-Gesellschaft berufen werden. Dies wird die Verbindungen zwischen dem CAS-MPG-Partnerinstitut und den deutschen Max-Planck-Instituten stärken sowie den wissenschaftlichen Austausch fördern. Gemeinsam streben die Chinesische Akademie der Wissenschaften und die Max-Planck-Gesellschaft eine nachhaltige Stärkung der Forschung in einem für die Zukunft überaus wichtigen Gebiet an. Zudem soll der bilateralen Forschungsk Kooperation beider Organisationen eine neue Qualität gegeben werden.



Mitten in der aufstrebenden Stadt Shanghai liegt das Shanghai Institute of Advanced Studies (SIAS), das auf Initiative der Max-Planck-Gesellschaft und der chinesischen Akademie der Wissenschaften eingerichtet und 2002 eröffnet wurde.

## BIOLOGISCHE STRUKTUREN

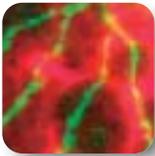
Die Strukturen lebender Organismen sind vielgestaltiger und komplexer als die der unbelebten Materie. Das gilt sowohl für die makroskopische Organisation der Lebewesen als auch für das mikroskopische Zusammenwirken der großen Moleküle, aus denen sie bestehen. Um die Vorgänge in lebenden Zellen genau zu verstehen, muss nicht nur der räumliche Aufbau der Makromoleküle in allen Einzelheiten bekannt sein, sondern auch ihr Zusammenwirken in großen Verbänden sowie die zeitlichen Veränderungen, denen sie unterliegen. Diese Aufgabe ist im Prinzip nahezu unbegrenzt – fast noch mehr als etwa in der Astrophysik. Sie hat weitreichende Konsequenzen für unser Weltbild und ein unabsehbares Potenzial für die Entwicklung neuer

medizinischer Wirkstoffe, biokompatibler Materialien und der Nanotechnologie. Trotz gewaltiger Fortschritte in den vergangenen 50 Jahren steht die Wissenschaft bei der Erforschung des biologischen Universums in vieler Hinsicht erst am Anfang. In den nächsten Jahrzehnten wird es einerseits darum gehen, die molekularen Grundlagen wichtiger Prozesse in lebenden Zellen möglichst vollständig aufzuklären. Zum anderen müssen neue Methoden für die mikroskopische Untersuchung und das makroskopische Verständnis biologischer Strukturen entwickelt werden. Diese beiden Hauptrichtungen in der künftigen biologischen Strukturforchung in der Max-Planck-Gesellschaft werden in den folgenden Beiträgen dargestellt.



### DIE STRUKTURBIOLOGIE DER ZUKUNFT

77



### STRUKTUREN DES LEBENS

80

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG, IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN



Die Strukturbiologie befasst sich mit dem räumlichen Aufbau der großen Moleküle. Insbesondere mit den Proteinen, aus denen jeder Organismus besteht und die ihn zum Leben befähigen. Das Ziel ist dabei, möglichst die Lage jedes einzelnen Atoms in den Proteinen zu bestimmen – eine notwendige, wenn auch nicht immer hinreichende Bedingung für das genaue Verständnis der Aufgaben, die sie im Organismus übernehmen. Die Strukturen der Zellbausteine werden mit den zueinander komplementären Methoden der Proteinkristallografie, Elektronenmikroskopie und NMR-Spektroskopie bestimmt, die an Instituten der Max-Planck-Gesellschaft angewendet und weiter entwickelt werden. Besondere Aufmerksamkeit finden dabei solche biologisch-medizinische Fragen, die sich den Routineverfahren der hypothesenfreien Forschung entziehen. Die Aufklärung der Struktur und Wirkungsmechanismen der wichtigsten Proteine und ihrer Verbände wird die Grundlagenforschung in der Max-Planck-Gesellschaft noch lange Zeit beschäftigen.

## DIE STRUKTURBIOLOGIE DER ZUKUNFT

### Komplexe biologische Systeme

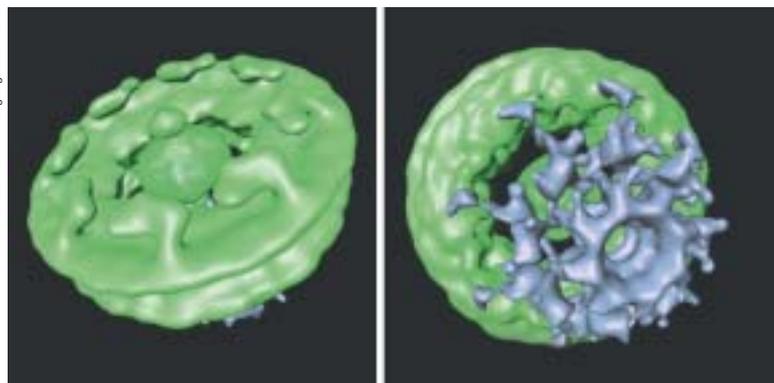
Die Aufgabe der Strukturbiologie ist komplex: Mehr als 30 000 Gene im menschlichen Genom ergeben den Bauplan für eine noch erheblich größere Zahl verschiedener Genprodukte. Die Genprodukte sind Proteine (Eiweiße), die eigentlichen Akteure in jeder lebenden Zelle. Nicht mitgerechnet sind andere Zellkomponenten wie Nukleinsäuren, Kohlenhydrate und Lipide, die meist eine passive Rolle spielen. Ihre Funktion im Organismus nehmen die verschiedenen Riesenmoleküle oft als größere Verbände wahr, deren Zusammensetzung genau geregelten räumlichen und zeitlichen Änderungen unterliegt.

Jede Spezies verfügt über ihr eigenes, prinzipiell unterschiedliches Proteinrepertoire. Schon die einfachste Bakterienzelle ist mit etwa 2000 verschiedenen Genprodukten schwer zu überschauen. Doch laufen viele lebenswichtige Prozesse überall nach dem gleichen Muster ab, und die beteiligten Proteine sind in allen Lebewesen ähnlich. Wenn die molekularen Mechanismen der Vererbung, der Proteinsynthese oder der Energieversorgung der Zelle (Abb. rechts) in einem Bakterium klar sind, werden sie beim Menschen nicht wesentlich anders ablaufen. Allerdings helfen einfache Modellorganismen nur bedingt weiter, wenn Lebensäußerungen verstanden werden sollen, die nur bei hoch entwickelten Organismen vorkommen, wie etwa die neuronale Signalübertragung. Bei der Aufklärung der molekularen Grundlagen dieser Vorgänge steht die Forschung erst am Anfang.

### Methoden zur Erforschung biologischer Strukturen

Die Strukturbiologie bringt Licht in den makromolekularen Dschungel, indem sie die dreidimensionale Struktur der einzelnen Makromoleküle oder Molekülverbände aufklärt. Seit ihren Anfängen und der Aufklärung der Strukturen der DNA durch Watson und Crick sowie des Myoglobins durch Kendrew und Perutz ist die Strukturbiologie auf die Entwicklung neuer Methoden angewiesen. Die wichtigsten physikalischen Methoden zur Strukturbestimmung sind die Röntgenkristallografie, die NMR-Spektroskopie und die Elektronenmikroskopie. Sie sind zueinander weitgehend komplementär.

MPI für Biochemie/Wolfgang Baumleister



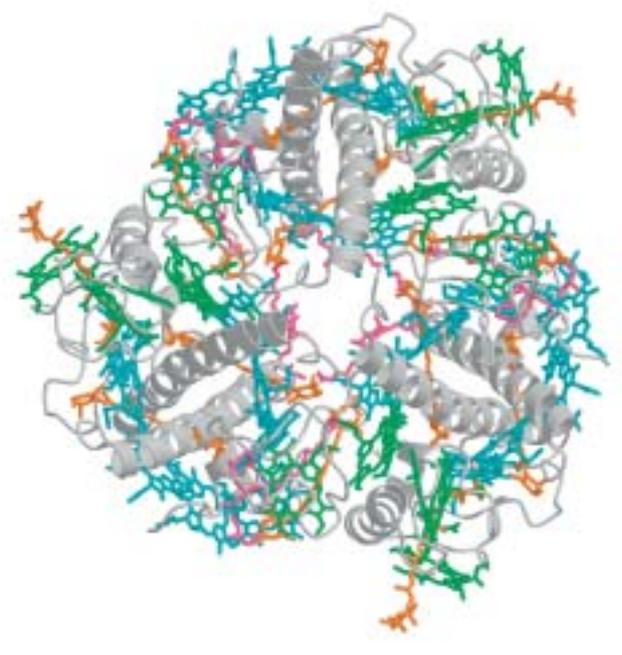
Dreidimensionale Struktur der Kernsporen des Schleimpilzes *Dictyostelium*. Sehr deutlich lassen sich in den 3D-Bildern die unterschiedlichen Ringe der Kernsporen, die den zentralen Transportkanal bilden, sowie die filamentösen Fortsätze auf der einen und die Korbstruktur auf der anderen Seite unterscheiden.

Die Röntgenkristallografie ist zweifellos die erfolgreichste Methode zur Bestimmung der exakten räumlichen Struktur biologischer Makromoleküle. Allerdings hat sie den Nachteil, dass die Proteine kristallisiert werden müssen. Das ist umso schwieriger, je größer und flexibler sie sind. Die Röntgenkristallografie benötigt intensive Röntgenstrahlung, die bisher nur an Großforschungseinrichtungen wie dem DESY in Hamburg oder dem ESRF in Grenoble erzeugt werden kann. An der Swiss Light Source (SLS) verfügt die

Max-Planck-Gesellschaft von 2005 an über eine eigene Strahlenquelle für ihre derzeit elf kristallografisch arbeitenden Abteilungen an den Max-Planck-Instituten in Martinsried, Frankfurt, Dortmund, Heidelberg und Göttingen sowie an den Max-Planck-Arbeitsgruppen in Hamburg. Am neuen PETRA-Speicherring des DESY steht den Instituten von 2009 an die weltweit intensivste Röntgenquelle für die Untersuchung kleinster Kristalle zur Verfügung.

**Ziel: Untersuchung von Proteinen in lebenden Zellen**  
Die NMR-Spektroskopie hat sich nach der Röntgenkristallografie als die zweitwichtigste strukturbiochemische Methode etabliert. Sie verfügt über ein breites Anwendungsspektrum, das von den Wechselwirkungen von Proteinen untereinander und mit kleinen Molekülen bis zur Aufklärung der Strukturen großer Makromoleküle reicht. Ein wichtiger Vorzug der Methode ist, dass die Proteine nicht kristallisiert werden müssen. Künftig wird es notwendig sein, die Empfindlichkeit der Methode erheblich zu steigern, was unter anderem durch höhere Magnetfeldstärken erreicht werden kann. Wenn das gelingt, könnten Proteine auch direkt in der lebenden Zelle untersucht werden. Ein weiteres Problem ist die Unterbestimmtheit der gemessenen Parameter. Hier könnte eine weitergehende Integration mit Methoden der Bioinformatik eine deutliche Verbes-

MPI für Biophysik/Werner Kühlbrandt



Struktur des Lichtsammelkomplexes LHC-II bei 2,5 Å Auflösung. Dieses Membranprotein ist in den Chloroplasten aller Pflanzen für die Aufnahme und Weiterleitung der Sonnenenergie zur Fotosynthese und Sauerstoffproduktion verantwortlich. Der Komplex besteht aus drei gleichen Untereinheiten, die sich jeweils aus einer Polypeptidkette (grau), 14 Chlorophyllen a und b (blaugrün und grün), vier Xanthophyllen (orange) sowie zwei verschiedenen Lipiden (rosa) zusammensetzen.

serung bewirken, insbesondere im Hinblick auf die Korrelation von Struktur und Thermodynamik. Schließlich muss die NMR schneller werden, um gegenüber der hoch entwickelten Röntgenstrukturanalyse mithalten zu können. In der Max-Planck-Gesellschaft wird die NMR-Spektroskopie vor allem in Göttingen weiterentwickelt. Intensive Zusammenarbeit besteht mit mehreren Max-Planck-Instituten sowie diversen Unternehmen im Bereich Pharmazie und Medizintechnik.

Auch in punkto Elektronenmikroskopie ist hinsichtlich der Detektor-Entwicklung, Probenpräparation, Elektronenoptik und Software noch viel an grundlegender Entwicklungsarbeit zu leisten, bevor ihr Potenzial für die Strukturbioogie voll ausgeschöpft werden kann. Diese Methode hat den Vorzug, dass sie gerade solche Proteine recht genau abbilden kann, die sich schwer oder gar nicht kristallisieren lassen. Das sind insbesondere Membranproteine aus mehrzelligen Organismen und große Molekülverbände. Anhand der elektronenmikroskopischen Bilder großer Komplexe oder von Teilen ganzer Zellen können die Kristallstrukturen der Komponenten zu Gesamtmodellen zusammengesetzt werden, für die sich die Systembiologie interessiert. Für einfache Viren sind solche Modelle bereits Realität. Wann es vergleichbar detaillierte Bilder einer lebensfähigen Zelle geben wird, ist noch nicht abzusehen.

Neben den physikalischen Methoden zur experimentellen Strukturbestimmung nehmen numerische Methoden in der Strukturbioogie einen immer größeren Raum ein. Ausgehend von den experimentell bestimmten Strukturen der Makromoleküle können ihre zeitlichen und räumlichen Veränderungen, die für das Verständnis ihrer Funktion wichtig sind, prinzipiell im Computer simuliert werden. Aber schon bei der Berechnung der Bewegungen, die ein mäßig großes System in einer Millionstelsekunde ausführt, stoßen die leistungsfähigsten Computer heute an ihre Grenzen. Am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie wird daran gearbeitet, die Simulation größerer Systeme auf biologisch relevante Zeiträume auszudehnen.

#### Aufgaben für die Zukunft

In der Strukturbioogie ist im „post-genomischen Zeitalter“ – also in der Folge der restlos gelesenen, aber bis jetzt nur zum kleinen Teil verstandenen Genomsequenzen – ein Paradigmenwechsel in Gang. Einige Gruppen sind vom klassischen, hypothesengeleiteten Ansatz abgewichen, der einen bestimmten biologischen Prozess in möglichst allen Einzelheiten verstehen will. Sie sind stattdessen zur hypothesenfreien Forschung übergegangen und versuchen, für bestimmte Organismen den räumlichen Aufbau aller Gen-

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für Biophysik, Frankfurt/Main
- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für experimentelle Medizin, Göttingen
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt/Main
- MPI für medizinische Forschung, Heidelberg
- MPI für molekulare Physiologie, Dortmund
- MPI für terrestrische Mikrobiologie, Marburg
- Max-Planck-Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie am DESY, Hamburg

produkte aufzuklären. Mit diesem quasi-industriellen Ansatz lassen sich viele neue Strukturen sammeln. Bereits jetzt zeichnet sich jedoch ab, dass ein großer Teil der Proteine, darunter vermutlich gerade die interessantesten, sich solchen automatisierten Verfahren entzieht.

Zu den schwierigen Fällen gehören neben den großen Molekülverbänden auch die Membranproteine. Das sind solche Proteine, die in die 0,000005 Millimeter dünne Lipidmembran eingebettet sind, die jede Zelle von ihrer Umgebung abgrenzt. Membranproteine sind Angriffspunkte für einen großen Teil der bekannten und noch zu entwickelnden Medikamente. Mit diesem Gebiet beschäftigen sich die Max-Planck-Institute in Frankfurt und Martinsried. Andere Max-Planck-Institute leisten Pionierarbeit bei ähnlich schwierigen Themen, die durch das Raster der hypothesenfreien Forschung fallen. Dazu gehören die Fasern und Motorproteine des Zellskeletts, die Proteine der Signalübertragung, das Spliceosom, das die Boten-RNA für die Proteinbiosynthese lesbar macht, und die Struktur und Funktion der Synapsen. Bei diesen und ähnlichen Fragen wird die Strukturbioogie mit Sicherheit noch lange ein aktuelles und wichtiges Gebiet der Grundlagenforschung in der Max-Planck-Gesellschaft bleiben.

Lebewesen aller Entwicklungsstufen sind durch die Komplexität ihrer räumlichen Struktur gekennzeichnet. Die Struktur bedingt die physiologische Funktion der Organismen, umgekehrt bedingt die Funktion diese Strukturen. Die biologische Forschung hängt daher mehr als jede andere naturwissenschaftliche Disziplin von der Entwicklung bildgebender Verfahren auf allen Längenskalen ab. Die Skala reicht dabei von den atomar aufgelösten Strukturen biologischer Makromoleküle bis zur satellitengestützten Kartierung ganzer Biotope. Wegen der engen Verzahnung von Struktur und Funktion kommt gerade bei der Aufklärung physiologischer Mechanismen jenen Verfahren besondere Bedeutung zu, mit denen in allen drei Raumdimensionen ortsaufgelöste Informationen aus dem Inneren lebender Organismen gewonnen werden können.

## STRUKTUREN DES LEBENS

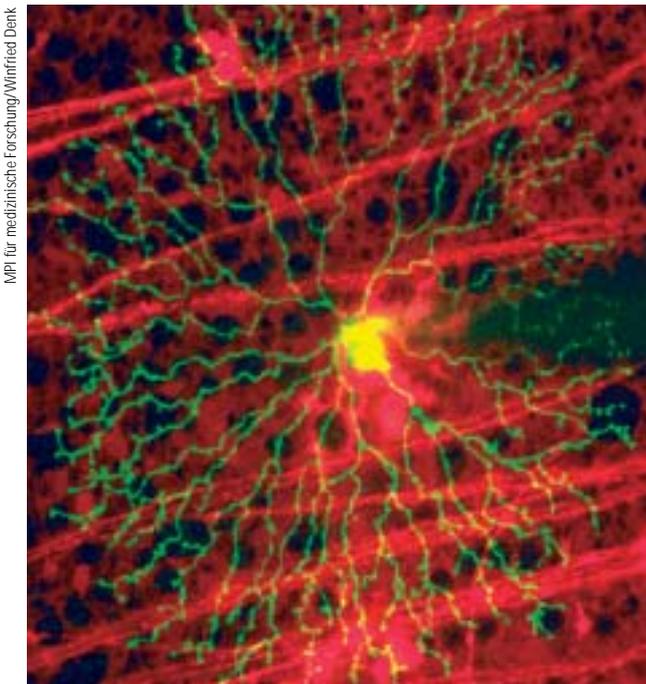
### Schlüsselmethode Lichtmikroskopie

Die Lichtmikroskopie ist eine der ältesten Methoden der Naturwissenschaften. Sie hat aber ihre Bedeutung für die Biologie behalten und sogar weiter ausgebaut: Denn sie ist die einzige Methode, die eine Beobachtung lebender Organismen mit gleichzeitig hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erlaubt. Besonders die Beobachtung zeitlich

veränderlicher Strukturen – sozusagen vierdimensionale Mikroskopie – ist für die Erkennung funktionaler Wirkungszusammenhänge bedeutend. Beispiele hierfür reichen von der Embryonalentwicklung über die Verarbeitung von elektrischen und chemischen Signalen in Nervenzellen bis zur Aktivitätsmessung neuronaler Ensembles.

Ein weiterer Grund für die Beständigkeit der Lichtmikroskopie als Schlüsselmethode liegt darin, dass sie sich ständig neue Technologien wie Laser-Lichtquellen, hochempfindliche Detektoren und chemische Einzelmolekülsensoren aneignet. Diese Entwicklung ist noch keineswegs abgeschlossen. So werden am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München neue Laser von immenser Zeitauflösung erforscht. Am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen wird seit einiger Zeit die von dem Jenaer Forscher Ernst Abbe schon im 19. Jahrhundert beschriebene und seitdem für unbezwinglich gehaltene Beugungsbarriere immer weiter überschritten. Von diesen Methoden wird erwartet, dass sie für das Verständnis zellphysiologischer Vorgänge wie der Mechanismen der Sekretion und der Zellteilung von unschätzbarem Wert sein werden.

Am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg werden Methoden weiterentwickelt, die mithilfe nicht linearer optischer Phänomene die Beobachtung zellulärer Vorgänge tief im intakten Gehirn erlauben. Diese Methoden werden am Münchner Max-Planck-Institut für Neurobiologie eingesetzt, um das Bewegungssehen der Fliege zu untersuchen und die chemischen Signale zu beobachten, die für dauerhafte Erinnerungen sorgen. Licht-



Das Zwei-Photonen-Fluoreszenzbild einer mit dem Kalziumindikator Oregon-Green Bapta-1 gefüllten Starburst-Amakrinzelle (grün) einer intakten Netzhaut. Rot dargestellt ist das zur Gegenfärbung eingebrachte Sulforhodamin.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für Entwicklungsbiologie, Tübingen
- MPI für medizinische Forschung, Heidelberg
- MPI für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden
- MPI für Neurobiologie, Martinsried
- MPI für Quantenoptik, Garching
- Max-Planck-Arbeitsgruppen für strukturelle Molekularbiologie am DESY, Hamburg

mikroskopische Verfahren sind außerdem nicht wegzudenken, wenn es um das Verständnis menschlicher Erkrankungen geht, die in Tiermodellen dargestellt werden können. So untersuchen die Max-Planck-Arbeitsgruppen am DESY in Hamburg die molekularen Mechanismen von Demenzerkrankungen unter anderem mit lichtmikroskopischen Methoden.

#### Mit der Kernspintomografie ins menschliche Gehirn blicken

Neben der Lichtmikroskopie ist die Kernspintomografie die wichtigste Methode zur Beobachtung lebender Organismen. Obwohl sich die räumliche und zeitliche Auflösung in den vergangenen Jahren erheblich verbessert hat, wird sie nie die Auflösung der Lichtmikroskopie erreichen. Andererseits erlaubt es aber die Kernspintomografie, auch Magnetresonananzabbildung genannt, zerstörungsfrei in das Innere des intakten menschlichen Gehirns zu blicken, dort die Gehirnaktivität räumlich aufgelöst zu messen und damit die physiologische Grundlage kognitiver Vorgänge zu untersuchen. Am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik wird mit diesen Verfahren untersucht, wie die elektrische Aktivität der Nervenzellen und damit die Informationsverarbeitung sich in dem vom Kernspintomografen gemessenen Signal niederschlagen. Das Verständnis dieser Verbindung verspricht wichtige Fortschritte in der eindeutigen Diagnose mentaler Erkrankungen.

#### Elektronentomografie soll die Lücke schließen

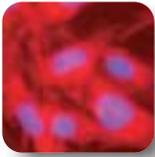
Unser heutiges Verständnis der Feinststruktur von Zellen basiert fast ausschließlich auf elektronenmikroskopischen Beobachtungen. Am Max-Planck-Institut für Biochemie

im München werden so genannte Elektronentomografie-Verfahren eingesetzt und weiterentwickelt. Sie sollen die Lücke zwischen der konventionellen Elektronenmikroskopie und der Strukturbiologie schließen und es künftig erlauben, die Lage einzelner Eiweißmoleküle in Zellen zu bestimmen. Dafür werden die Zellen so schnell eingefroren, dass sich die Lage und Struktur einzelner Moleküle gegenüber dem lebenden Zustand praktisch nicht verändern kann. Weiter werden am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung elektronenmikroskopische Verfahren entwickelt, die die Rekonstruktion von zellulären Netzwerken mit nanoskopischer Auflösung erlauben. Dies verspricht die Lücke zwischen konventioneller Elektronenmikroskopie und Lichtmikroskopie zu schließen.

## GESUNDHEIT

Die biomedizinische Grundlagenforschung kann inzwischen beachtliche Erfolge vorweisen. Künftig wird sie verstärkt wissenschaftliche Lösungen für dringende Gesundheitsfragen anbieten – etwa für schwer behandelbare Infektionskrankheiten in Afrika und Asien sowie für die zunehmenden alterstypischen Erkrankungen. Dank der Fortschritte der Biotechnologie und der Bioinformatik können nunmehr die hochspezialisierten Kompetenzen der naturwissenschaftlichen Fächer mit der klinischen Forschung zu Netzwerken verknüpft werden. Kaum ein Gebiet der Biomedizin wird derzeit so kontrovers diskutiert wie die Stammzellforschung. Mit diesem Ansatz kann jedoch geklärt werden, auf welche Weise die durch einen pathologischen Zellabbau verursachten Erkrankungen zu

behandeln und vielleicht sogar zu heilen sind. Darüber hinaus ermöglicht die Infektionsbiologie besonders eindrucksvolle Einblicke in das Wechselspiel zwischen dem menschlichen Organismus und potenziell schädigenden Faktoren. Die Übertragung von Ergebnissen der Grundlagenforschung in die Praxis ist nicht zuletzt wegen des unterschiedlichen wissenschaftlichen Hintergrunds von klinisch tätigen Medizinern einerseits und Laborforschern andererseits schwierig. Um diesen bidirektionalen Prozess zwischen Krankenbett und Labor zu optimieren, entwickelte die Max-Planck-Gesellschaft mehrere Modellsysteme des Wissenstransfers. Das Beispiel der Depressionsforschung zeigt, wie ein erfolgreicher Dialog zwischen Medizinern im Grundlagenlabor und in der Arbeit mit Patienten entsteht.



### CHEMISCHE GENOMIK

83



### DIE BEDEUTUNG DER GRUNDLAGENFORSCHUNG FÜR THERAPIEN MIT STAMMZELLEN

86



### DIALOG ZWISCHEN GRUNDLAGENWISSENSCHAFTEN UND MEDIZINISCHER ANWENDUNG

89

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN



In der chemischen Genomik werden hochspezifische Molekülsonden als leistungsfähige Werkzeuge in der biologischen und biomedizinischen Forschung eingesetzt. Solche kleinen, biologisch aktiven chemischen Substanzen können aus dem Substanzreservoir der Natur oder durch kombinatorische Chemie gefunden werden. Diese Kombination chemischer und biologischer Methoden eröffnet einerseits für die Grundlagenforschung im Bereich der Biowissenschaften ganz neue Möglichkeiten. Andererseits kann sie einen tiefgreifenden Einfluss auf die Umsetzung der gewonnenen grundlegenden Erkenntnisse in mögliche Anwendungen haben. Besser als rein genetische und molekularbiologische Verfahren erlauben die bei der chemischen Genomik identifizierten Substanzen eine systemische Untersuchung von ganzen Zellen und Organismen im Hinblick auf eine medizinische Relevanz der biologischen Forschung. Wenn der biologische Effekt ausreichend studiert und in punkto therapeutische Relevanz validiert ist, wird die niedermolekulare Substanz als dann ebenfalls biologisch validierte Leitstruktur zur Entwicklung potenzieller Wirkstoffe dienen. Mehrere Max-Planck-Institute arbeiten zusammen, um solche molekulare Sonden für biologische Untersuchungen zu entwickeln.

## CHEMISCHE GENOMIK

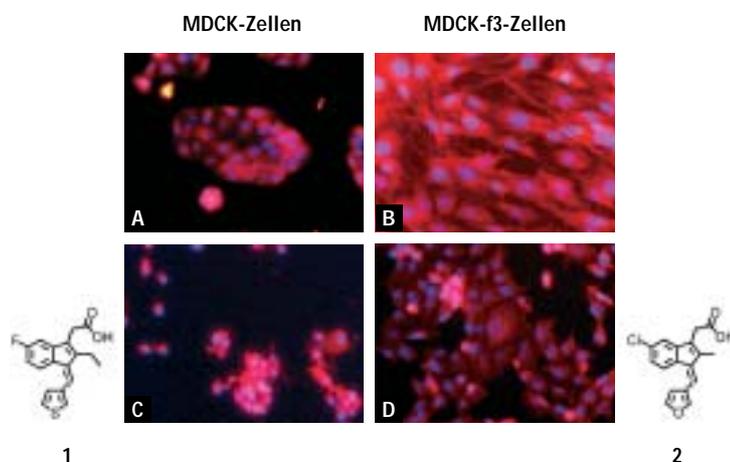
### Grundlage für das Verständnis von Zellen und Organismen

Bahnbrechende Entwicklungen in den Biowissenschaften zeigten in der vergangenen Dekade, dass alle biologischen Vorgänge auf chemischen Prozessen basieren und durch die Struktur der beteiligten Moleküle sowie deren Wechselwirkungen bestimmt werden. Im Grunde können alle biologischen Vorgänge auf chemische reduziert werden: Die Biologie ist molekular, und heute sind viele biologische Phänomene im molekularen Detail untersucht und verstanden. Insbesondere mit der Sequenzierung der Genome des Menschen, der Maus, der Ratte, der Hefe, von Bakterien, von Reis und vielen anderen Organismen ist die Grundlage geschaffen worden, um ein komplettes Verständnis von Zellen und Organismen zu erlangen. Um dies zu erreichen, muss die biologische Forschung aber über die Ebene der genetischen Information hinausgehen und sich mit der Funktion, der Modifikation und der Wechselwirkung von Proteinen und Modulatoren ihrer Aktivität auseinandersetzen.

In einem zellbiologischen Assay wurde die Zell-Morphologie durch Immunomarkierung der intrazellulären F-Actin-Fasern (rot) und durch Färbung der Zellkerne (blau) sichtbar gemacht. Normale MDCK-Zellen haben ein rundes, regelmäßiges Aussehen und wachsen aneinander geschichtet (Foto A). Währenddessen zeigt Foto B eine durch gezielte Mutation in einem Krebs-Gen hergestellte Zelllinie (MDCK-f3) ein spindelartiges, längliches Aussehen ohne Zellkontakte. Durch Zugabe von Substanz 1 verändert sich das Aussehen von MDCK-f3 Zellen. Die Wirkung der Mutation wird kompensiert. Durch diese Umkehrung des biologischen Effekts, der durch eine Mutation in einem Krebs-Gen hervorgerufen wird, kann auf den molekularen Angriffspunkt der chemischen Substanz in den Krebs-Zellen geschlossen werden. (Foto C). Gibt man Substanz 2 zu MDCK-F3 Zellen (Foto D), treten sie in einen apoptotischen Zustand (Zelltod), was an der geschwollenen runden Zellform und den geschrumpften Zellkernen erkennbar ist.

MPI für molekulare Physiologie/Herbert Waldmann, Rolf Breinbauer

**Die chemische Genomik und ihr Forschungsansatz**  
Zurzeit wird ein Forschungsansatz wichtig, der sich wirkstoffartiger Moleküle als modulierender Liganden für zellbiologische Untersuchungen bedient, um beispielsweise das Verständnis der Funktion bestimmter Gen-Produkte zu ermöglichen. Manche dieser mit chemischen Methoden herstellbaren Molekülsonden wie etwa Brefeldin (Studium von Transportvorgängen in Zellen) oder Colchizin (Studium der Zellteilung) haben ganze Arbeitsgebiete der modernen Biologie erst ermöglicht oder zumindest befruchtet. Während solche Sondenmoleküle lange aufgrund zufälliger Entdeckungen und Beobachtungen aufgefunden wurden,



erlauben die erzielten Fortschritte in der Automatisierung und Parallelisierung von chemischer Synthese und biologischen Screeningmethoden den systematischen Einsatz von Wirkstoffmolekülen zur Untersuchung von biologischen Phänomenen. Der unter den Begriffen Chemische Genetik (Studium einzelner Genprodukte mit einer Kombination chemischer und biologischer Methoden), Chemische Genomik (analoges Studium gesamter Genome) und Chemische Proteomik (analoges Studium aller Proteine, die aus einem Genom hervorgehen) summarisch gefasste Ansatz besitzt gegenüber etablierten genetischen Methoden entscheidende Vorteile.

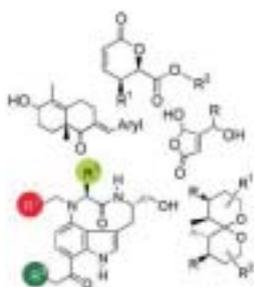
So erfolgt die Wirkung von kleinen Molekülen sehr rasch und aufgrund des Metabolismus und der Ausscheidung reversibel, wodurch eine zeitlich kontrollierte Untersuchung der Proteinfunktion möglich ist. Der Effekt ist regulierbar, denn durch Änderung der Konzentrationen der verwendeten Substanzen lassen sich unterschiedlich starke Ausprägungen des Phänotyps, also des gesamten Erscheinungsbilds der untersuchten Zelle oder Organismus, einstellen. Darüber hinaus kann die Wirkung in der Entwicklung des

Organismus zu jedem beliebigen Zeitpunkt ausgelöst werden: Sie ist also konditional. Schließlich kann der Effekt von jedem, der Zugang zu der Substanz hat, wiederholt werden.

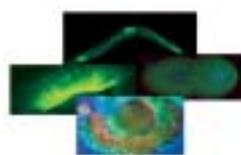
#### Die Suche nach molekularen Sonden für die chemische Genetik

Entscheidend für den Erfolg dieses Forschungsansatzes ist es, die richtigen wirkstoffartigen Substanzen und Moleküle, also die Liganden zu identifizieren. Die binden sich mit hoher Affinität spezifisch an eines oder wenige unter etwa 100 000 verschiedenen Proteinen. Moderne Methoden der kombinatorischen Chemie machen es möglich, so genannte Bibliotheken biologisch potenziell relevanter chemischer Substanzen herzustellen. Bei der kombinatorischen Chemie werden durch Kombination und Variation verschiedener Molekülreste an einem Grundgerüst eine Vielzahl von Molekülen erzeugt, aus der diejenigen mit den gewünschten oder optimierten Eigenschaften herausgesucht werden müssen. Dabei kommen Computer und automatisierte Anlagen zum Einsatz, um gleichzeitig große Mengen verschiedenartiger Substanzen zu gewinnen.

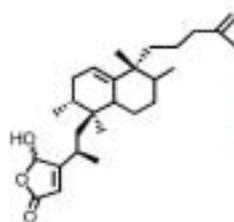
#### VORWÄRTSGERICHTETE CHEMISCHE GENETIK



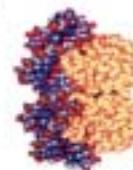
Substanz-Bibliothek



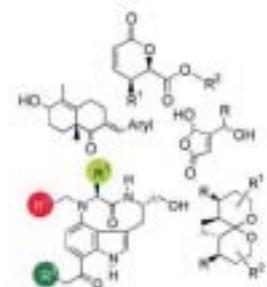
Biologische Antwort (Phänotyp)



Biologisch aktives Molekül



Target-Protein



Substanz-Bibliothek

#### REVERSE CHEMISCHE GENETIK

In der chemischen Genetik wird eine Molekülbibliothek in einem Screeningprozess auf ihre biologische Aktivität untersucht. Ruft dabei eine Substanz einen interessanten biologischen Effekt hervor, kann das entsprechende Target-Protein identifiziert werden. Umgekehrt kann die biologische Bedeutung eines aus der Genomforschung identifizierten Proteins mithilfe einer Molekülbibliothek einen Liganden identifizieren, der an das Protein bindet. Damit lassen sich in der lebenden Zelle oder einem Modellorganismus Studien durchführen, die die Funktion des zu untersuchenden Proteins erkennen lassen.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
- MPI für molekulare Physiologie, Dortmund
- MPI für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden
- MPI für Psychiatrie, München
- MPI für Züchtungsforschung, Köln

Weitere Molekülsonden können durch die Isolierung oder chemische Totalsynthese von Naturstoffen gewonnen werden. Dabei handelt es sich um komplexe Moleküle, die von Pflanzen oder tierischen Organismen hergestellt werden und in einem evolutionären Prozess über Millionen von Jahren zur Erzielung eines biologischen Effekts optimiert worden sind. Die so erhaltenen Molekülbibliotheken werden anschließend in einer Vielzahl von funktionellen Testsystemen auf ihre biologische Wirkung hin untersucht. Bei diesen automatisierten Screeningverfahren werden mit optischen Methoden die Veränderung von Zellgestalt oder ganzen Organismen verfolgt. Mit fluoreszenzbasierten Methoden werden Biomarker lokalisiert und quantifiziert. Identifiziert man Substanzen, die dabei einen bestimmten, möglichst vordefinierten biologischen Effekt erzeugen, dient die chemische Verbindung als Ausgangspunkt zum Studium des Effekts und zur Identifizierung des entsprechenden Zielproteins. Mit den Methoden der Genom- und Proteomanalyse wird der Einfluss eines Proteins oder einer Wirksubstanz auf die komplexe Einheit einer ganzen Zelle analysiert. Steht schließlich das Zielprotein fest, kann die Substanz als Werkzeug für ausführliche biologische Untersuchungen mit den oben beschriebenen Vorteilen genutzt werden. Wenn der biologische Effekt ausreichend studiert und für seine therapeutische Relevanz validiert ist, kann die niedermolekulare Substanz als hilfreiche Leitstruktur zur Entwicklung potenzieller Medikamente dienen.

Die chemische Genomik bietet damit einen neuen Ansatz für die Grundlagenforschung in den Biowissenschaften, indem sie die jeweiligen Stärken der Biologie und der Chemie miteinander verbindet. Darüber hinaus verspricht sie eine höhere Effizienz bei der Auffindung von Leitstrukturen für die Wirkstoffentwicklung, da sie beide Fächer in einem frühen Stadium der Forschung einbezieht und somit bereits als biologisch relevant erkannte Substanztypen identifiziert.

Bis vor einigen Jahren war der Begriff Stammzellen in der Öffentlichkeit nahezu unbekannt. Inzwischen ist er zu einer Zauberformel geworden, der große Erwartungen für innovative Behandlungsverfahren, aber auch erhebliche Skepsis entgegengebracht werden. Schätzungen zufolge könnte nahezu die Hälfte der Bevölkerung von der Stammzellforschung profitieren – entsprechend groß sind die Hoffnungen direkt und indirekt Betroffener. Die Diskussion zur Erforschung und zum Einsatz humaner embryonaler Stammzellen ist wegen der therapeutischen Hoffnung einerseits und des Einsatzes von Embryonen andererseits kontrovers. Welche therapeutischen Einsatzmöglichkeiten bieten adulte und embryonale Stammzellen? Diese Frage kann nur die Grundlagenforschung in Verbindung mit geeigneten Tiermodellen beantworten, indem Charakteristika adulter und embryonaler Stammzellen auf molekularer Ebene verstanden werden. Erst dann ist es möglich, deren jeweilige Potenz auszuschöpfen und neue therapeutische Ansätze zu entwickeln.

## DIE BEDEUTUNG DER GRUNDLAGENFORSCHUNG FÜR THERAPIEN MIT STAMMZELLEN

### Eigenschaften von pluripotenten Stammzellen

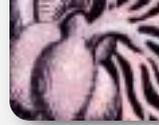
Der frühe Embryo von Säugetieren enthält so genannte pluripotente Zellen, die alle Zelltypen des Körpers bilden können. Diese zellulären Alleskönner treten nur für eine kurze Periode während der Entwicklung auf. Beim Menschen findet man die Zellen etwa vom vierten bis zum siebten Tag nach der Befruchtung, bei der Maus etwa vom dritten bis zum fünften Tag. Im Gegensatz zu dieser recht kurzen Entwicklungsperiode im Embryo können sich diese Zellen unter geeigneten Bedingungen in Kulturen als embryonale Stammzellen unbegrenzt vermehren. Vor mehr als 20 Jahren wurden die ersten Zelllinien der Maus etabliert, bei menschlichen Linien gelang dies erstmals 1998. Diese Stammzellen sind weiterhin pluripotent, weil sie in Kultur eine Vielzahl unterschiedlicher Zelltypen bilden können. Humane embryonale Stammzellen könnten in Zukunft eine unerschöpfliche Quelle für Transplantationstherapien sein. Zuerst muss jedoch gezeigt werden, dass die differenzierten Zellen in einem Tiermodell Symptome einer Krankheit mildern können. Ein entscheidender Schritt in der Stammzellforschung wäre getan, wenn etwa Diabetes oder Parkinson bei Rhesusaffen mit menschlichen, von embryonalen Stammzellen abgeleiteten Zellen therapiert werden können. Zudem muss in funktionellen Langzeitstudien gezeigt werden, dass sich die Zellen richtig im Organ integrieren und keine Tumore verursachen.

### Adulte Stammzellen und ihre Spezifika

Adulte Stammzellen sind undifferenzierte Zellen, die in einem ansonsten differenzierten Gewebe oder Organ vorkommen. Sie erneuern sich ein Leben lang, wobei sie einerseits identische Kopien ihrer selbst erzeugen, ande-

rerseits in spezialisierte Zellen des jeweiligen Gewebes differenzieren. Forscherinnen und Forscher haben adulte Stammzellen in einer Vielzahl von Organen und Geweben entdeckt. Die Verwendung adulter Stammzellen für die Therapie von Krankheiten des Menschen wäre aus verschiedenen Gründen von Interesse: Zum einen ist es die Aufgabe einer adulten Stammzelle, unterschiedliche Zellen eines bestimmten Gewebes oder Organs zu bilden. Daher sollte es bei deren Transplantation möglich sein, die unterschiedlichen Zelltypen eines Gewebes oder Organs zu regenerieren. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass Stammzellen auch zum beeinträchtigten Gewebe wandern können. Eine solche Fähigkeit würde die Applikation von Stammzellen erheblich erleichtern, weil man bei der Transplantation das Zielgewebe weniger präzise treffen müsste.

Die Hoffnung, dass eine Reihe von Krankheiten eines Tages mit Stammzellen behandelt werden können, beruht vor allem auf dem langjährigen Erfolg von Knochenmarkstransplantationen. Völlig überraschend war die Entdeckung vor etwa fünf Jahren, dass selbst adulte Stammzellen eines ausgewachsenen Organismus sich nicht nur in Zellen des Gewebetyps, in dem sie sich befinden, sondern auch in Zellen eines anderen Gewebes entwickeln können. Die anfängliche Euphorie, dass durch adulte Stammzellen eines Organsystems auch andere Gewebe und Organe therapiert werden könnten, wurde aber durch neuere Ergebnisse gedämpft. Die Grundlagenforschung muss nun ermitteln, welches Potenzial adulte Stammzellen tatsächlich besitzen und wie es erweitert werden kann. Vielleicht wird dabei sogar festgestellt, dass selbst differenzierte Zellen sich für Therapien eignen. Dies erscheint nicht unmöglich, weil

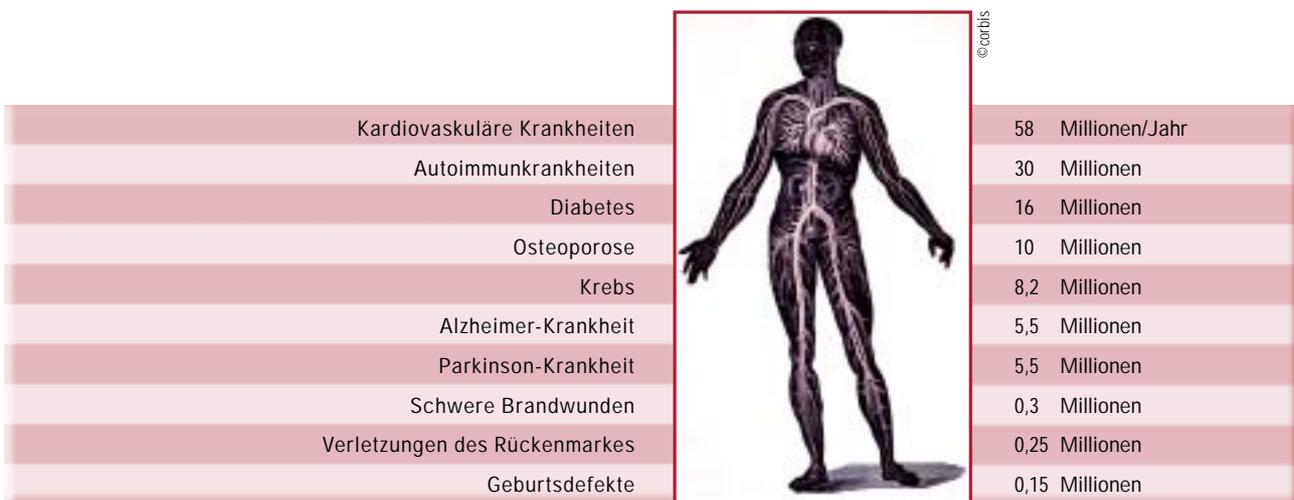


Kerne differenzierter Zellen nach Transfer in Eizellen sogar die Grundlage zu einem ganzen Organismus bilden können. Dies wurde am Beispiel des Klonschafs Dolly besonders eindrucksvoll gezeigt.

**Die Gewinnung körpereigener pluripotenter Stammzellen**  
Eine Stammzelltherapie ist sowohl mit fremden als auch mit eigenen Zellen denkbar. Bei der Verwendung fremder embryonaler oder adulter Stammzellen ist die immunologische Unverträglichkeit zwischen dem Zellspender und dem Empfänger eine große Hürde. Ihr Vorteil besteht allerdings darin, dass Mediziner sie einem gesunden Organismus entnehmen können. Eine Transplantation fremder adulter oder differenzierter embryonaler Stammzellen ist daher

beispielsweise zur Therapie genetischer Erkrankungen prinzipiell sinnvoll. Sollte das Problem der immunologischen Unverträglichkeit zwischen Spender und Empfänger gelöst werden und sollten außerdem genügend Stammzellen zur Verfügung stehen, könnten sie für die Therapie einer Reihe von Krankheiten eingesetzt werden.

Eigene adulte Stammzellen würden es erlauben, das Problem der immunologischen Unverträglichkeit zu umgehen. Allerdings ist fraglich, ob und wie viele adulte Stammzellen einem kranken Körper entnommen werden können. Es ist auch ungewiss, wie viele adulte Stammzellen eines bestimmten Typs ein alternder Mensch besitzt, von einem alternden kranken Menschen ganz abgesehen.



US-Patientengruppen, denen Stammzell-Therapien helfen könnten. Quelle: Patient's voices: the powerful sound in the stem cell debate. Perry, D. Science 287, 1423 (2000).

## BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Herz- und Lungenforschung, Bad Nauheim
- MPI für molekulare Biomedizin, Münster
- MPI für molekulare Zellbiologie und Genetik, Dresden
- In Vorbereitung: Max-Planck-Forschungsgruppe Stammzellbiologie und Geweberegeneration an der Universität Ulm

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass Ärzte bei einer genetischen Erkrankung auch die Zellen des Patienten verwenden müssten, die eine schädliche Mutation tragen. In solchen Fällen müsste der genetische Defekt in den Stammzellen vor der Transplantation korrigiert werden. Dieses Verfahren ist aber in adulten Stammzellen momentan kaum umsetzbar. Dagegen ist für embryonale Stammzellen – sowohl für die der Maus als auch des Menschen – die Methodik der Genveränderung etabliert. Ein Vorgehen, das in einer Reihe von Tierversuchen erfolgreich durchgeführt wurde, ist der Kerntransfer somatischer Zellen in entkernte Eizellen, um über Blastozysten embryonale Stammzellen zu gewinnen. Das herkömmliche, in Tierversuchen eingesetzte Kerntransferverfahren erfordert die Verwendung von natürlichen Eizellen. Es scheint nun aber möglich, in der Kultur Eizellen aus embryonalen Stammzellen zu erzeugen. Mithilfe solcher Eizellen werden die Forscherinnen und Forscher vielleicht in der Lage sein, nach Kerntransfer neue Stammzellen auch ohne natürliche Eizellen zu generieren.

Um auf dem eben skizzierten Weg embryonale Stammzellen erzeugen zu können, ist es nötig, den in die Eizelle übertragenen Kern einer ausgereiften Körperzelle zu reprogrammieren, also das genetische Programm zu verjüngen, indem es auf einen frühen Startpunkt in der Embryonalentwicklung zurückgestellt wird. Viele Gene, die in den jeweiligen Körperzellen aktiv waren, müssen abgeschaltet werden. Andere, die inaktiv waren, müssen wieder angeschaltet werden. Statt einer Eizelle könnten eventuell auch embryonale Stammzellen verwendet werden, um einen somatischen Kern zu verjüngen. Eine wichtige Aufgabe

wird es sein, die zellulären Faktoren aus Ei- oder Stammzellen zu bestimmen, die für die Verjüngung des somatischen Kerns verantwortlich sind. Dadurch lässt sich vielleicht ein Verfahren zur Herstellung körpereigener, individueller embryonaler Stammzellen ohne Einsatz von Eizellen und embryonalen Zellen entwickeln. Dieser Themenbereich zählt nicht nur zu den derzeit interessantesten der biologischen Grundlagenforschung, sondern besitzt auch ein immenses therapeutisches Potenzial.

Die größte Zukunftsaufgabe der Medizin ist, durch Prävention von Erkrankungen die Gesundheitsspanne an die Lebensspanne heranzuführen. Das in vielen Max-Planck-Instituten bereits erarbeitete Detailwissen muss durch neue Auswertungsstrategien vernetzt werden, damit sich die Grundlagen- und die Therapieforschung gegenseitig verstärken können. Die Max-Planck-Gesellschaft steht vor der großen Herausforderung, ihr Aufgabenfeld an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und klinischer Anwendung neu zu definieren. Dies ist wichtig, denn in einer Gesellschaft mit steigendem Durchschnittsalter und sinkender Geburtenrate stehen Fragen nach dem Gesundheitszustand der Bevölkerung an erster Stelle der Politik. Heute sorgt sich die Öffentlichkeit um die Kosten für die Wiederherstellung der Gesundheit im Krankheitsfall. Morgen wird die Aufgabe lauten: Was muss geschehen, damit immer weniger und immer ältere Menschen so produktiv bleiben, um in der Weltgesellschaft sozial, kulturell und materiell zu bestehen? Die Max-Planck-Gesellschaft ist gerüstet, das Navigationssystem für die künftige medizinische Forschung zu gestalten.

## DIALOG ZWISCHEN GRUNDLAGENWISSENSCHAFTEN UND MEDIZINISCHER ANWENDUNG

### Kernkompetenzen vertiefen und vernetzen

Zahlreiche Institute der Max-Planck-Gesellschaft erarbeiten mit großem Erfolg hoch spezialisiertes Wissen an physiologischen und pathologischen Modellsystemen, die sich von der Entwicklungsbiologie verschiedener Arten bis hin zu kompliziertesten Organsystemen wie der Hirnrinde erstrecken. Darüber hinaus existieren in der Max-Planck-Gesellschaft zahlreiche Ansätze, die eine gezielte Entwicklung von Modellen für komplexe Erkrankungen des Gehirns ermöglichen, wie Schlaganfall, Multiple Sklerose oder Depression. Die hierbei erzielten Forschungsergebnisse bilden das Fundament für die Aufklärung von Krankheitsursachen und damit für die wichtigste Zukunftsaufgabe der Medizin, die Krankheitsprävention. Nur sie wird eine tatsächliche Kostensenkung im Gesundheitswesen bewirken.

Die Grundlagenforschung beschäftigte sich bisher fast ausschließlich mit der Aufdeckung von Genmutationen an Modellsystemen sowie mit den daraus resultierenden Funktionsänderungen von Zielstrukturen. Die Analyse von Krankheitsursachen auf molekularer und systemischer Ebene an Tiermodellen kann aber nur ein Zwischenergebnis darstellen. Um den Sprung in die Präventionsmedizin zu schaffen, müssen die bereits vorhandenen Kompetenzen noch effizienter verknüpft werden. Komplexe Erkrankungen entstehen durch die Interaktion der individuellen Disposition mit äußeren Einflüssen. Auch die Krankheitsprävention muss diese Wechselwirkung verstehen und nutzen.

Hierfür bildet die Infektionsbiologie ein besonders eindrucksvolles Beispiel: Ihre zentrale Fragestellung ist auf das komplexe Zusammenspiel zwischen mikrobiellen

Krankheitserregern und ihrem menschlichen Wirt gerichtet. Diese Wechselbeziehung hat sich im Lauf der Evolution als äußerst nützlich erwiesen. Gerät sie aus dem Gleichgewicht, werden allmählich pathologische Prozesse in Gang gesetzt, die nach neueren Forschungsergebnissen auch an der Entstehung von Demenzen und Herz-Kreislauferkrankungen beteiligt sind. Chronische Entzündungen können wiederum zu Krebserkrankungen führen, da sie die in der Erbsubstanz niedergelegte genetische Information verändern. Nur ein besseres Verständnis des molekularen und zellulären Zusammenspiels von Mikroorganismen und menschlichem Wirt eröffnen daher neue Wege in der Bekämpfung von Infektionskrankheiten.



Am MPI für Psychiatrie erfolgt der Forschungstransfer direkt von der Klinik in das Labor und zurück.

Die Erforschung von Entstehung, Verhinderung und Behandlung komplexer Erkrankungen erfordert die Zusammenführung der Kompetenzen über Institutsgrenzen hinaus sowie die Beteiligung klinischer und industrieller Partner. Die bei solchen Großprojekten entstehenden Datenmengen sind jedoch so strukturiert, dass sie nur mit völlig neuartigen Strategien aus der Bioinformatik ausgewertet werden können. Auch die Biophysik spielt eine zunehmend wichtigere Rolle, vor allem im Bereich der Nanotechnologie, der Übernahme von Organfunktionen durch Bioprothesen und der bildgebenden Verfahren. Diese erlauben die Beobachtung biochemischer Prozesse in lebenden Systemen einschließlich des Menschen.

Schließlich eröffnet der Weg vom mutierten Gen und veränderten Protein zur Entdeckung von Interventionsstrategien einen neuen Bereich für die chemische Forschung, der heute als chemische Genomik bezeichnet wird. Forscherinnen und Forscher untersuchen, welche Struktureigenschaften chemische Moleküle besitzen müssen, um relevante Gene selektiv zu regulieren und die Funktion von Zielstrukturen – zumeist von Proteinen – zu beeinflussen. Die chemische Genomik stellt somit eine innovative Berührungfläche zwischen der molekulargenetischen und systemphysiologischen Grundlagenforschung sowie der vorwiegend durch Industrieunternehmen betriebenen Arzneimittelforschung dar. Allerdings nutzen heute in der Entwicklung befindliche Medikamente nur einen Bruchteil der bereits bekannten Zielstrukturen, sodass sich hier ein Forschungsgebiet mit großem Zukunftspotenzial entwickelt.

#### Entdeckung neuer Therapiewege bei Depressionen

Aus gesundheitsökonomischer Sicht bildet die Depression heute eine der größten Belastungen in den westlichen Industrieländern. Die verfügbaren Medikamente wirken zu langsam, weisen zu viele Nebenwirkungen und bei zu vielen Patienten einen zu geringen Erfolg auf. Diese Substanzen wurden allerdings ohne jedes Wissen über die biochemischen Ursachen der Erkrankung eingeführt. Durch die Verknüpfung der Kompetenzen zahlreicher Arbeitsgruppen innerhalb des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie (Humangenetik, Mausgenetik, molekulare Pharmakologie, Systemphysiologie, Verhaltensbiologie, klinische Neuroendokrinologie und Therapieevaluation) konnte hingegen ein neues Therapiekonzept entwickelt werden, nämlich Medikamente, die in das Stresshormonsystem eingreifen. Den Anstoß hierzu gab die aus der klinischen Erfahrung gewonnene Entdeckung, dass bei depressiven Patienten die im Gehirn regulierte Stresshormonaktivität gestört ist.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für experimentelle Medizin, Göttingen
- MPI für extraterrestrische Physik, Garching
- MPI für Herz- und Lungenforschung, Bad Nauheim
- MPI für Immunbiologie, Freiburg
- MPI für Infektionsbiologie, Berlin
- MPI für Neurobiologie, Martinsried
- MPI für Psychiatrie, München

Klinische Ergebnisse der Humangenetik standen auch am Anfang einer anderen zukunftsweisenden Entdeckung, die auf einem am Max-Planck-Institut für Psychiatrie entwickelten hypothesenfreien Ansatz beruht. Genetische Analysen an verschiedenen Populationen in Bayern und Quebec deckten eine Mutation auf, durch die ein neuartiger Wirkmechanismus für antidepressive Medikamente identifiziert werden konnte. Tierexperimentelle Untersuchungen sowie zellphysiologische und molekularbiologische Studien wiesen nach, dass diese Genmutation zu Funktionsänderungen einer Zielstruktur in der Nervenzellmembran führt, die durch Medikamente modulierbar sind. Hierdurch ergeben sich innovative therapeutische und präventive Möglichkeiten.

Inzwischen steht fest, dass weder eine rein hypothesengeleitete noch eine ausschließlich systematische, d. h. hypothesenfreie Vorgehensweise zum Erfolg führt. Entscheidend für die Entdeckung von Genen, deren Polymorphismen (Austausch einzelner Nukleinbasen) die Prädisposition für komplexe Erkrankung wie etwa der Depression oder das Ansprechen auf Psychopharmaka vorhersagen, war der kontinuierliche Dialog zwischen systematischem Versuchsansatz und Hypothesenbildung. Diese Beispiele verdeutlichen, dass in der Max-Planck-Gesellschaft Modelle des Forschungstransfers von der Klinik in das Labor und zurück etabliert werden konnten. Nur dieser Transfer ermöglicht die erfolgreiche Bearbeitung der großen medizinischen Zukunftsaufgaben.

## ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

Eine der markantesten Veränderungen industrialisierter Gesellschaften und der Dritten Welt ist ihr Älterwerden (Abb. S. 94). Personen leben länger und Gesellschaften erreichen ein höheres Durchschnittsalter als früher. Die Suche nach den Gründen dieser Veränderungen führt zu der Frage nach den Ursachen des Alterns überhaupt: Worin bestehen die genetischen Voraussetzungen des Alterns? Wie können Krankheiten im Alter früher erkannt und wirksamer geheilt werden? Wie lassen sich körperliche und geistige Fähigkeiten im Alter erhalten? Welche gesellschaftlichen Veränderungen sind vonnöten, um die Produktivität älterer Men-

schen besser zur Geltung zu bringen? Die Max-Planck-Gesellschaft hat die Bedeutung der Gerontologie, der Wissenschaft vom Altern und Alter, erkannt und fördert bereits seit Jahrzehnten mit Erfolg die Altersforschung an mehreren Instituten. Darüber hinaus hat die der Max-Planck-Gesellschaft zwei neue Forschungsinitiativen beschlossen, um die Erforschung des Alterns verstärkt voranzutreiben: die Neugründung eines Instituts zur Erforschung der biologischen Grundlagen des Alterns und das MaxNet Aging, ein internationales Netzwerk zur Erforschung des Alterns in den Verhaltens-, Sozial- und Geisteswissenschaften.

### GRUNDLAGEN DER BIOLOGIE DES ALTERNS – NEUGRÜNDUNG EINES INSTITUTS

92



### INTERNATIONALES MAX-PLANCK-FORSCHUNGSNETZWERK ALTERN

94



MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN

Biologisches Altern ist ein normaler Prozess, der zumindest teilweise durch genetische Programme gesteuert wird und in einem komplexen Wechselspiel mit exogenen Einflüssen zu einer erhöhten Anfälligkeit des Organismus für chronische Krankheiten führt. Während angesichts der demografischen Entwicklung in den industrialisierten Staaten die typischen Alterskrankheiten des Menschen intensiv erforscht werden, ist erst wenig über die grundlegenden genetischen und biochemischen Mechanismen des Alterns bekannt. Zur Erforschung dieser Vorgänge mit einem interdisziplinären Ansatz plant die Max-Planck-Gesellschaft die Gründung eines Instituts für Biologie des Alterns. Langfristiges Forschungsziel ist es, durch ein eingehendes Verständnis der molekularen Prozesse des Alterns die gesunde Lebensspanne des Menschen zu verlängern. Untersuchungen an Modellorganismen sollen mit einer vergleichenden Genom-Analyse am Menschen verknüpft werden.

## GRUNDLAGEN DER BIOLOGIE DES ALTERNS – NEUGRÜNDUNG EINES INSTITUTS

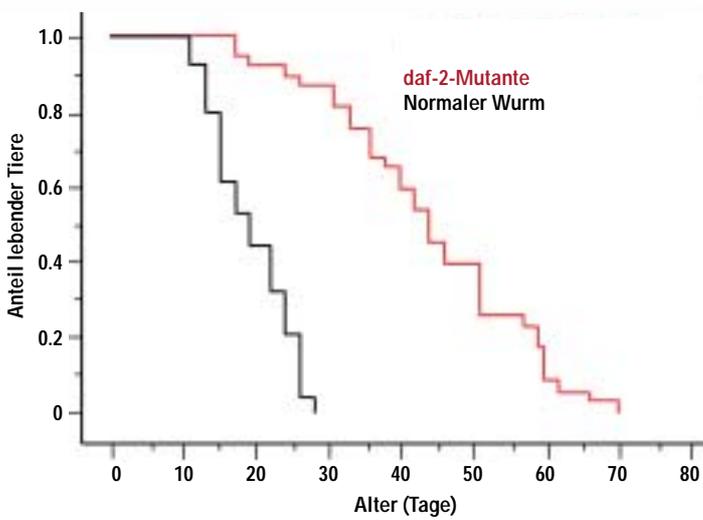
### Bedingungen des gesunden Alterns verstehen

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat sich die Lebenserwartung der Menschen in den industrialisierten Staaten enorm verlängert: von 50 auf über 75 Jahre. Im Jahr 2050 wird etwa ein Drittel der Bevölkerung in Deutschland über 65 sein. Die großen ökonomischen und sozialen Auswirkungen dieser demografischen Entwicklung werden bereits an den Max-Planck-Instituten für demografische Forschung in Rostock und für Bildungsforschung in Berlin untersucht. Ebenfalls als Antwort auf diese Entwicklung werden weltweit Milliarden in die Erforschung von Alterskrankheiten wie der Alzheimerschen Demenz und der Herz-Kreislauf-Krankheiten investiert. Neu ist hingegen die Einsicht, dass

biologisches Altern nicht grundlegend ein pathologischer Prozess, sondern ein normaler, zumindest teilweise genetisch bestimmter Vorgang ist. Die biologischen Mechanismen des normalen Alterns sind noch weitgehend unerforscht. Die Max-Planck-Gesellschaft beabsichtigt daher, das europaweit erste Institut für die Biologie des Alterns zu gründen. Grundlage für diese Initiative ist die Auffassung des Alterns als Prozess im Wechselspiel zwischen genetischen Steuerprogrammen und exogenen Einflüssen. Langfristiges Forschungsziel ist es, die Bedingungen für das gesunde Altern des Menschen zu verstehen.

### Gleiches Alter und doch unterschiedlich fit

Es existieren überraschend wenig gesicherte Erkenntnisse über die Biologie des Alterns. Es gibt viele Personen, die zwar gleich alt sind, aber aufgrund ihrer körperlichen und geistigen Fitness sehr unterschiedlichen Altersstufen angehören. Das chronologische Alter korreliert also nur ungefähr mit den biologischen Mechanismen, die den Alternsprozess bestimmen. Zwei Arten von Mechanismen sind dabei relevant: Einmal diejenigen, die für den Erhalt bestimmter biologischer Funktionen im erwachsenen Organismus sorgen. Zum anderen sind das Prozesse, die den fortschreitenden Verlust bestimmter Funktionen und letztlich den Eintritt in die Phase der Seneszenz mit stark ansteigender Sterberate bedingen. Diese Mechanismen sollen interdisziplinär unter Verwendung genetischer, zellbiologischer und biochemischer Methoden, unter Einbeziehung moderner Methoden zur Bestimmung der Eiweißbestandteile von Zellen (Proteomics) sowie mithilfe systembiologischer Ansätze untersucht werden. Von zentraler Bedeutung sind dabei folgende Fragen: Welche genetischen Programme bestimmen die



Überlebenskurven normaler Fadenwürmer (schwarz) im Vergleich zu Tieren, deren Lebensspanne durch eine Mutation im Daf-2-Gen verlängert ist (rot). Die mutierten Tiere leben im Mittel doppelt so lange wie normale Würmer.

Modifiziert nach Dorman, J. B. et al.

Lebensspanne eines Organismus und auf welche Weise greifen externe Faktoren in diesen Prozess modulierend ein? Welches sind die Schlüssel-moleküle für die Ausführung dieser Programme auf der zellulären und organismischen Ebene? Welche Rolle spielt die in gealterten Zellen und Organen nachweisbare Oxidation von Proteinen und Nucleinsäuren (oxidativer Stress)? Wie wird sie ausgelöst? Welche zellulären Schutzmechanismen existieren dagegen und wie bestimmen externe (epigenetische) Einflüsse wie Ernährung, Infektionen und Stress das Altern?

### Untersuchungen an Modellorganismen

Bei Studien an Modellorganismen wie dem Fadenwurm *C. elegans* und der Fruchtfliege *Drosophila* wurde entdeckt, dass der Alterungsprozess unter anderem durch ein Signalsystem kontrolliert wird, das der Wirkung von Insulin und dem Insulin-artigen Wachstumsfaktor IGF-1 ähnlich ist. Mutationen im *Daf-2*-Gen, das zu diesem System gehört, können beim Wurm die Lebensspanne verdoppeln (Abb. S. 92). In Kombination mit anderen Mutationen lässt sich sogar eine bis zu fünffache Lebensverlängerung erzielen. Wichtig ist, dass die Tiere dabei aktiv bleiben und wesentlich länger jugendlich erscheinen als normale Würmer. So prägen sich bei den jung gebliebenen Tieren degenerative Alterserscheinungen wie die Ablagerung von Eiweißverklumpungen in den Zellen wesentlich später aus als in den normal gealterten Würmern (Abb. unten).

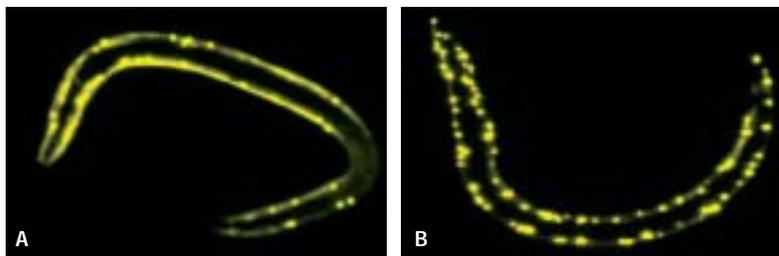
Ähnliche Proteinaggregate sind beim Menschen für die Alzheimersche Demenz und die Chorea Huntington charakteristisch. Der das Altern verzögernde genetische Eingriff aktiviert wahrscheinlich so genannte Stressproteine, die die Eiweiße der Zelle vor Verklumpung schützen. Diese Ergebnisse sind auf Maus und Ratte als klassische Säugermodelle übertragbar, wenn auch hier die Verlängerung der Lebensspanne weniger dramatisch ist: Ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wie Untersuchungen an relativ einfachen Modellorganismen zu grundlegenden mechanistischen Erkenntnissen führen können. Allerdings wird dieser Ansatz in der Altersforschung noch nicht systematisch eingesetzt. Die Max-Planck-Gesellschaft will daher in einem neuen Institut Forschergruppen vereinen, die vergleichend an evolutionär verschiedenen Modellorganismen mit unterschiedlicher Komplexität und Nähe zum Menschen arbeiten. Dies soll ergänzt werden durch Studien an menschlichen Zellen in Kultur sowie einer biochemischen Analyse der molekularen Veränderungen, die das Altern charakterisieren.

### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für demografische Forschung, Rostock
- MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für Psychiatrie, München

### Übertragbarkeit auf den Menschen

Der Fadenwurm lebt normalerweise nur zwei bis drei Wochen, der Mensch kann aber 100 Jahre alt werden. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit Ergebnisse an Modellorganismen auf den Menschen übertragbar sind. Fadenwurm, Fruchtfliege, Maus, Ratte und Mensch sind trotz ihrer unterschiedlichen Komplexität genetisch überraschend ähnlich. Die gerade abgeschlossene Aufklärung des Rattengenoms zeigt, dass sich für 90 Prozent der menschlichen Gene ein entsprechendes Gen bei der Ratte findet. Moderne Methoden der vergleichenden Genomforschung, die bereits an den Max-Planck-Instituten für evolutionäre Anthropologie, molekulare Genetik und Psychiatrie praktiziert werden, sollen die Bedeutung der an Modellorganismen definierten Schlüsselgene des Alterns beim Menschen untersuchen helfen. Probenmaterial hierfür kann im Rahmen eines europäischen Großprojekts gewonnen werden. Unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für demografische Forschung sollen fast 3000 über 90 Jahre alte Geschwisterpaare über ihre Lebensgewohnheiten befragt und um Blutproben gebeten werden. Es ist zu erwarten, dass die Vernetzung mit diesem Projekt wichtige Synergien mit der in einem neuen Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns durchgeführten Forschung ergeben wird.



Mikroskopische Aufnahmen zweier chronologisch gleich alter Fadenwürmer, in deren Muskelzellen Eiweißverklumpungen (Aggregate) nachgewiesen wurden (gelbe Färbung). Das Tier auf Foto A trägt eine lebensverlängernde Mutation und weist nur wenige Aggregate auf. Dagegen enthalten die Muskelzellen des normal gealterten Tieres (Foto B) viele Aggregate, die zu einer ausgeprägten Bewegungs-lähmung führen.

Northwestern University, Evanston, USA/Richard Morimoto

Die Erforschung des Alterns ist ein wichtiges wissenschaftliches und gesellschaftliches Anliegen, das der interdisziplinären Kooperation zwischen Experten unterschiedlicher Fächer bedarf. Mit der Gründung eines Internationalen Max-Planck-Forschungsnetzwerks für Alternsforschung (MaxNet Aging) rückt die Max-Planck-Gesellschaft Altern als individuelles und gesellschaftliches Phänomen in den Vordergrund des Interesses. In Kooperation mit hochrangigen internationalen Forschungseinrichtungen sollen zentrale Fragen der Alternsforschung gebündelt und bearbeitet werden.

## INTERNATIONALES MAX-PLANCK-FORSCHUNGS- NETZWERK ALTERN

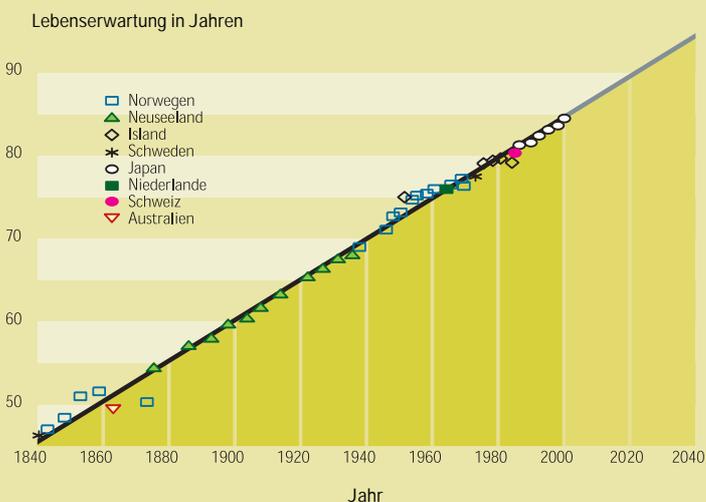
### Alter und Altern angemessen erklären

Viele wissenschaftliche Disziplinen arbeiten verstärkt an der Erforschung des Alterns. Historiker und Anthropologen vergleichen die Entwicklungsmöglichkeiten älterer Menschen in verschiedenen historischen Epochen und Kulturen. Philosophen und Psychologen stellen Fragen nach dem erfüllten Leben und Sterben im Alter. Demografen untersuchen die Einflüsse von Geburtenrate, Lebenserwartung und Einwanderung auf die Altersstruktur der Bevölkerung. Soziologen und Wirtschaftswissenschaftler entwerfen neue Formen gesellschaftlicher Produktivität im Alter. Rechtswissenschaftler entwickeln gesellschaftliche Regeln

und Normen, die auch in einer älter werdenden Gesellschaft den verschiedenen Generationen und Lebensaltern gerecht werden sollen. Psychologen bestimmen die Trainierbarkeit von Gedächtnis und Lernfähigkeit im Alter sowie deren Grenzen. Kognitive Neurowissenschaftler untersuchen, wie sich das Verhältnis zwischen Gehirnaktivität und Verhalten im Laufe des Erwachsenenalters verändert. Und Biologen erforschen die genetischen Regeln des Alterns und erkunden dessen Plastizität (Veränderbarkeit).

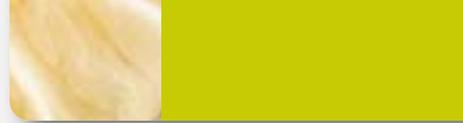
Diese unterschiedlichen Forschungsrichtungen verbindet der Anspruch, Alter und Altern angemessen zu erklären und somit eine bessere Gestaltung individuellen und gesellschaftlichen Alterns zu ermöglichen. Die gegenwärtige Forschung löst diesen Anspruch nur in Ansätzen ein: Die Grundlagen des Alterns sind nur unzulänglich erforscht, und das Wissen der verschiedenen Disziplinen wird zu selten miteinander kombiniert. Deswegen bleibt oft unklar, wie komplexe Forschungsfragen, die mehrere Disziplinen zugleich betreffen, in durchführbare und aussagekräftige Forschungsvorhaben überführt werden können.

Um hier einen Fortschritt zu erzielen und das Wissen vom Altern auf eine tragfähige Basis zu stellen, hat die Max-Planck-Gesellschaft die Gründung eines Internationalen Max-Planck-Forschungsnetzwerks für Alternsforschung beschlossen. Das Netzwerk wird international führenden



MPI für Bildungsforschung/Ulman Lindenberg

Die Lebenserwartung der Menschen wächst. Personen leben länger und Gesellschaften erreichen ein höheres Durchschnittsalter als früher.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI für Biochemie, Martinsried
- MPI für demografische Forschung, Rostock
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für Psychiatrie, München
- und weitere Institute der MPG sowie internationale Partner



© corbis

Altern als Chance: Das MaxNet Aging rückt Altern als individuelles und gesellschaftliches Phänomen in den Vordergrund seiner Forschungen.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Institutionen auf verschiedenen Gebieten der Altersforschung die Möglichkeit bieten, gemeinsam interdisziplinäre Fragestellungen zu definieren und Forschungsaktivitäten zu koordinieren. Gleichzeitig werden herausragende junge Forscherinnen und Forscher im Rahmen des Netzwerks die Gelegenheit erhalten, in einem internationalen Umfeld innovative und interdisziplinäre Fragestellungen der Altersforschung zu bearbeiten. Schließlich erprobt die Max-Planck-Gesellschaft mit der Schaffung dieses Netzwerks ein neues Instrument der Forschungsförderung, um flexibel und effektiv Schwerpunkte zu setzen und Forschungsfelder zu erschließen.

Das Netzwerk ist zunächst auf fünf Jahre angelegt. Neben Web-basierten Diskussionsforen sind zwei mehrtägige Treffen pro Jahr zu einem zentralen Thema gerontologischer Forschung vorgesehen.

Folgende Themen sind denkbar:

- Bildungsprozesse im Alter
- Biologische und soziale Ursachen der Langlebigkeit
- Demografische Entwicklung
- Drittes und viertes Lebensalter: Lebensqualität versus Lebensquantität
- Ebenen der Plastizität im Alter: Gehirn, Verhalten, Gesellschaft
- Ethische und philosophische Überlegungen zu Tod und Sterben
- Experimentelle Simulation und formale Modellierung von Alterungsprozessen
- Gesundheitskosten im Alter
- Kulturelle Vorstellungen über die Lebensalter und Lebensverlauf im Vergleich
- Methoden der Längsschnittforschung
- Recht und alternde Gesellschaft
- Reifung und Alterung: Gemeinsamkeiten und Unterschiede
- Soziale und emotionale Dimensionen des Alterns; Spiritualität und Lebensinn
- Theorien und Voraussetzungen erfolgreichen Alterns

## KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

Hirnforschung ist ein mutiges Unterfangen, denn das menschliche Gehirn ist das komplexeste Gebilde im gesamten Universum. Hirnforschung scheint aber auch ein Widerspruch in sich zu sein: Denn wie soll ein menschliches Gehirn sich selbst ergründen? Hirnforschung stellt zudem Fragen zum menschlichen Selbstverständnis: Was ist Bewusstsein, wie ist das Leib-Seele-Problem zu verstehen und wie entwickeln sich Gehirn und Geist? Hirnforschung ist außerordentlich wichtig, um Menschen mit neurologischen und psychiatrischen Erkrankungen zu helfen. In den vergangenen Jahrzehnten haben die Neurowissenschaften weltweit einen enormen Aufschwung genommen: Auch die Max-Planck-Gesellschaft hat die Neurowissenschaften durch Institutsneugründungen zu einem Schwerpunkt ausgebaut. So wurden die Max-Planck-Institute für biologische Kyber-

netik, für Neurobiologie, für neurologische Forschung, für psychologische Forschung, für Neuropsychologie, für Psycholinguistik und für Verhaltensbiologie gegründet. Die einzelnen Institute betreiben die Neurowissenschaften von den molekularen Grundlagen bis zur Kognition. Drei Gebiete werden im Folgenden als künftige Forschungsschwerpunkte vorgestellt: Wie entwickelt sich das Gehirn, was ist durch die Gene festgelegt und was wird durch Erfahrung und Lernen eingepägt? Wie lassen sich kognitive Funktionen erforschen, welche Beiträge liefern tierexperimentelle Befunde und wie können kognitive Prozesse und höhere Gehirnfunktionen beim Menschen untersucht werden? Im Bereich Gehirnfunktionen und Altern geht es um die Frage, wie unterscheidet sich die geistige Leistungsfähigkeit in der Jugend und im Alter?



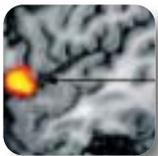
### DIE ENTWICKLUNG DES GEHIRNS

97



### KOGNITIVE NEUROBIOLOGIE

100



### NEUROKOGNITION: KOGNITIVE PROZESSE UND GEHIRNFUNKTIONEN DES MENSCHEN

103



### PSYCHISCHE ENTWICKLUNG DES MENSCHEN ÜBER DIE LEBENSSPANNE: PERSONALITÄT UND HANDLUNGSKOMPETENZ

106

MIT DEM URKNAL/  
ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDI

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELNEUE MATERIALIEN  
PRÄGEN DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTURTHEORIE UND  
MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN:  
BIOLOGIE UND KULTURKOMPLEXES  
NETZWERK GEHIRNSOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN



Das menschliche Gehirn – mit seinen Milliarden von Nervenzellen, verbunden durch unzählige Bahnen, Schaltkreise und Synapsen – entwickelt sich aus einer einzigen befruchteten Eizelle. Gebildet werden die Nervenzellen des Gehirns in bestimmten Wachstumszonen, um dann ihren Geburtsort zu verlassen und in ihre Zielgebiete zu wandern. Dort siedeln sie sich in bestimmten Gehirnarealen und Schichten an und differenzieren zu unterschiedlichen Klassen sowie Typen von Neuronen. Nervenzellfortsätze, so genannte Dendriten und Axone, wachsen und bilden präzise Verknüpfungen zwischen unterschiedlichen Gehirnarealen und Neuronen. Zum Schluss entstehen zwischen den vernetzten Nervenzellen Synapsen: Das Gehirn ist funktionsfähig. Noch ist es allerdings nicht ausgereift. Seine volle Leistungsfähigkeit erreicht es erst durch Interaktion mit der Umwelt, durch Erfahrung. Diese Abschnitte der Hirnentwicklung sollen in künftigen Projekten der Max-Planck-Gesellschaft verstärkt untersucht werden.

## DIE ENTWICKLUNG DES GEHIRNS

**Neben den Genen spielt die Erfahrung eine große Rolle**  
Bei allen Säugetieren sind die wichtigsten Schaltkreise des Gehirns sehr ähnlich aufgebaut. Der hohe Grad an fester Verdrahtung im Gehirn wird vermutlich durch die Gene festgelegt. Derzeit geht die Wissenschaft davon aus, dass 30 bis 50 Prozent der rund 30 000 menschlichen Gene ihre Funktion hauptsächlich im Gehirn ausüben. Dieses Größenverhältnis lässt die Komplexität der genetischen Steuerung des Gehirns und seiner Entwicklung erahnen. Die Ursache für viele neurologische Erkrankungen liegt in Defekten jener Gene, die bei der Entwicklung des Gehirns eine Rolle spielen. Rund die Hälfte aller genetischen Erkrankungen betrifft das Nervensystem.

Gleichwohl können die Gene die Verknüpfungen zwischen den Nervenzellen des Gehirns nicht in allen Einzelheiten festlegen, denn das Gehirn enthält Billionen von Synapsen. Viel zu viele, als dass die Gene sie im Detail vorgeben könnten. Es muss also vorausgesetzt werden, dass neben den Genen vor allem Nutzung und Erfahrung (Sehen, Hören, Tasten, Bewegen) bei der endgültigen Entwicklung und Feinabstimmung der neuronalen Schaltkreise im Gehirn eine entscheidende Rolle spielen. Das Zusammenspiel von Genen und Erfahrung bei der Entwicklung des Gehirns wird auf drei Ebenen untersucht.

**Wie die Fortsätze von Nervenzellen ihre Zielgebiete finden**  
Vieles spricht für das Konzept der chemischen Signale: Auswachsene Nervenzellendigungen werden durch chemische Gradienten bestimmter Lockstoffe angezogen oder

durch andere Substanzen abgestoßen und so in eine bestimmte Richtung gelenkt. Im Zielgebiet heften sie sich an andere Zellen, zu denen sie eine chemische Affinität aufweisen. Eine Vielzahl solcher Lenksubstanzen ist mittlerweile bekannt wie etwa die Netrine und Semaphorine. Auch wurden sehr viele Molekülfamilien identifiziert, die das Anheften und Ausbilden von synaptischen Kontakten ermöglichen (Cadherine, Ephrine, Neurexine). Ergänzend zu den chemischen Signalen ist es nötig, dass die synaptischen Kontakte durch Nutzung verstärkt werden und bei geringer Nutzung abgebaut werden.

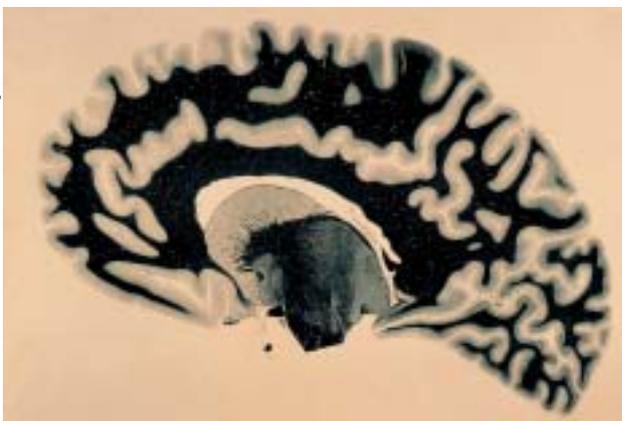
Ein Muster für dieses Wechselspiel zwischen der Zielfindung durch die Gene und die Erfahrung sind die Ganglienzellen der Netzhaut. Sie senden ihre Axone gesteuert durch chemische Signale in diverse visuelle Zentren des Gehirns. Beide Netzhäute werden durch ein genetisches Programm in Form einer Landkarte auf das Zielgebiet abgebildet. Diese Karte ist sehr grob, sie wird erst durch aktives Sehen nach der Geburt verfeinert. Weitgehend unbekannt ist die Art und Weise, wie synaptische Kontakte verstärkt oder vermindert werden. Diese Plastizität synaptischer Verbindungen spielt nicht nur bei der Entwicklung des Gehirns eine wichtige Rolle, sondern auch das Lernen beim erwachsenen Gehirn scheint darauf zu beruhen, dass synaptische Verbindungen verstärkt und abgebaut werden. Die Struktur, Funktion und Entwicklung von Synapsen werden an den Max-Planck-Instituten für biophysikalische Chemie, experimentelle Medizin, Hirnforschung und Neurobiologie untersucht.

### Entwicklung und Unterscheidung von Hirnarealen

Schon vor hundert Jahren fanden A. W. Campbell (1904) und K. Brodmann (1907) heraus, dass die Großhirnrinde aufgrund der Schichtung und der Gestalt der Nervenzellen in mannigfache Areale unterteilt werden kann. Diese sind mit unterschiedlichen Funktionen belegt. In jüngster Zeit ermöglichten es vor allem die Anwendung bildgebender Verfahren wie der funktionellen Kernspintomografie, bestimmte Leistungen definierten Stellen des menschlichen Gehirns zuzuordnen. Allein im Sehgehirn unterscheidet man mittlerweile mehr als 30 Areale, in denen Fähigkeiten wie die Unterscheidung von Farben, das Sehen von Bewegungen oder das Erkennen von Gesichtern lokalisiert sind. Noch ist weitgehend unbekannt, welche Signale zur Diffe-

renzung, also zur Gestaltbildung der Neurone der Hirnrinde führen. Warum werden einige Neurone zu Pyramidenzellen, andere jedoch zu Sternzellen? Geboren werden die Nervenzellen der Hirnrinde in der so genannten Ventrikulärzone. Von dort wandern sie dann in bestimmte Schichten der Hirnrinde ein. Erste Forschungsergebnisse belegen, dass Mutationen in bestimmten Genen zu pathologischen Veränderungen der Schichtstruktur der Hirnrinde führen – beispielsweise in Genen, die für Reelin/Disabled oder für Doublecortin kodieren. Die neue Technik, die Expression bestimmter Proteine zu unterdrücken (sRNA-Interferenz), wie auch die zunehmende Verfügbarkeit transgener Mäuse machen es möglich, an diesen die genetische Steuerung der Entwicklung der Großhirnrinde zu untersuchen. Durch gentechnische Verfahren werden einzelne Nervenzellen im Gehirn der Maus markiert und so die Wanderung und Differenzierung dieser Zellen *in vivo* untersucht. Schließlich lassen sich mit modernen Abbildungsverfahren die elektrischen Signale in der Hirnrinde erfassen, um so die Funktion der sich entwickelnden Hirnareale zu untersuchen. Die Entwicklung von Hirnarealen der Maus wird an den Max-Planck-Instituten für biophysikalische Chemie, für medizinische Forschung und für Neurobiologie untersucht. Darüber hinaus haben sich in der vergangenen Dekade computergestützte Modellierung und theoretische Analyse als wichtiger Zugang zum besseren Verständnis von Strukturbildungsprozessen in der Hirnrinde erwiesen und bilden einen Schwerpunkt der theoretischen Arbeiten am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation. Die Entwicklung der Großhirnrinde soll bei der Neuausrichtung des Max-Planck-Instituts für Hirnforschung einen Forschungsschwerpunkt bilden.

MPI für Hirnforschung/Heinz Wässle



Das Bild zeigt einen Längsschnitt durch ein menschliches Gehirn. Angefärbt (schwarz) sind nicht die Nervenzellen des Gehirns, sondern die Fasern, die sie miteinander vernetzen. Ein Kubikmillimeter Gewebe enthält mehr als einen Kilometer Fasern. Das ganze Gehirn ist durch Faserstränge von rund einer Million Kilometer Gesamtlänge verkabelt.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für biophysikalische Chemie, Göttingen
- MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
- MPI für experimentelle Medizin, Göttingen
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt/Main
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für medizinische Forschung, Heidelberg
- MPI für molekulare Genetik, Berlin
- MPI für Neurobiologie, Martinsried
- MPI für Ornithologie, Seewiesen

#### Die Entwicklung der kognitiven Funktionen

Jeder der im Erwachsenenalter mühsam eine Fremdsprache erlernt, bewundert den leichten und schnellen Spracherwerb bei Kleinkindern. Es ist spannend zu beobachten, nach welchen offenbar festen Regeln Kinder das Sprechen lernen. Die moderne Linguistik hat diesen Lernprozess gut beschrieben. Die dabei im Gehirn ablaufenden Vorgänge sind jedoch weitgehend unbekannt. Am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig wird die Sprachentwicklung bei Kleinkindern mit modernen Methoden der Neurophysiologie (evozierte Potenziale) und bei älteren Kindern mit Hilfe der Bildgebung (funktionelle Kernspintomografie) untersucht.

Die funktionellen Eigenschaften einzelner Neurone im Säugerhirn sind gut erforscht. Die Wahrnehmung von Objekten und die Ausführung von Bewegungen kommen jedoch erst durch das Zusammenspiel von vielen Neuronen in unterschiedlichen Arealen zustande. Es ist unbekannt, wann in der Entwicklung die Gruppierung von Nervenzellen zu solchen Ensembles beginnt, und was deren raumzeitliche Struktur bestimmt. Durch elektrophysiologische Ableitungen vom Primatengehirn mit Multi-Elektroden, durch Verhaltenstests und durch nichtinvasive bildgebende Verfahren sollen die raumzeitlichen Erregungsmuster einer Vielzahl von Neuronen untersucht werden, um so ihr Zusammenspiel bei der bewussten Wahrnehmung zu verstehen (Max-Planck-Institut für Hirnforschung). Gut lassen sich solche Entwicklungsvorgänge am Vogelgehirn untersuchen, denn abhängig von der Jahreszeit und gesteuert durch Hormone wachsen dort die Gesangsareale oder werden abgebaut. Am Max-Planck-Institut für Ornithologie und am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik wird

diese Plastizität des Gehirns untersucht. Theoretische Modelle zur Reifung des Gehirns werden am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation erstellt.

Für alle drei genannten Schwerpunkte lassen sich auch neurologische Erkrankungen des Menschen anführen: Die „Pfadfindung“ der Axone ist bei Albinos gestört, bei Lissenzephalie entwickelt sich die Hirnrinde unvollständig, und bei Legasthenie sind Lesen, Schreiben und Sprachentwicklung beeinflusst. Derzeit können diese Krankheiten noch nicht geheilt werden. Ein Verständnis der Ursachen lässt jedoch auf die Möglichkeit gezielter Therapien hoffen.

Die systemische Neurowissenschaft hat sich bis vor kurzem fast ausschließlich auf physiologische Studien verlassen. Die dabei angewandte Technik war zwar nützlich für die Charakterisierung der physiologischen Eigenschaften verschiedener Strukturen, doch lassen sich mit dieser Methode keine Informationen über die Raum-Zeit-Kooperativität und die gesamten Assoziationsprozesse neuraler Netzwerke sammeln. Die Zukunft der systemischen Neurowissenschaft hängt von der Entwicklung und Anwendung integrativer Methoden ab. Aufzeichnungen von einzelnen Zellen, umfangreiche Aufzeichnungen mit Elektroden- oder Tetrodenanordnungen, die Beobachtung von Aktionspotenzialen und von langsamen Hirnwellen und die bildgebenden Verfahren der Neurowissenschaften müssen künftig eingesetzt werden, um herauszufinden, wie das Gehirn unterschiedliche Verhaltensweisen hervorruft. Dabei sind abbildende Techniken von wesentlicher Bedeutung.

## KOGNITIVE NEUROBIOLOGIE

Beim ersten Blick auf das Gemälde von Dalí (Abb. S. 101) erkennen Sie wahrscheinlich das Gesicht eines Mannes, den Blick nach oben gerichtet, die Lippen gespitzt unter einem buschigen Schnurrbart. Beim zweiten Hinschauen ordnet sich das Bild neu: Die Nase und der weiße Bart des Mannes werden Haube und Umhang einer sitzenden Frau. Das Glimmen in den Augen des Mannes erweist sich als Licht in den Fenstern zweier Häuschen, die sich an dunkle Abhänge schmiegen.

### Systemische Neurowissenschaft heute

Als Salvador Dalí 1940 das Gemälde *Alter, Jugend, Kindheit (Die drei Lebensalter)* geschaffen hat, spielte er mit der Fähigkeit des Betrachters, ein und dieselbe Darstellung als zwei verschiedene Bilder auszulegen. Mehr als 60 Jahre später nutzen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ähnlich zweideutige visuelle Reize um herauszufinden, welche Aktivität des Gehirns hinter einer Wahrnehmung und dem visuellen Bewusstsein liegt. Im Mittelpunkt steht dabei folgende Frage: Was geschieht im Gehirn in dem Moment, in dem ein Zuschauer die über die Sinne aufgenommenen Daten zu einer vereinheitlichten Wahrnehmung organisiert?

Bis vor kurzer Zeit verließ sich die systemische Neurowissenschaft, in der solche Fragen nachgegangen wird, fast ausschließlich auf physiologische Studien. Mit einer einzelnen Mikroelektrode ist feststellbar, wie viele Aktionspotenziale innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit von einem Neuron produziert werden. Zwar erwies sich diese Technik als sehr nützlich für die Charakterisierung der physiologischen Eigenschaften verschiedener Strukturen, doch lassen sich mit dieser Methode keine Informationen

über die Raum-Zeit-Kooperativität und die gesamten Assoziationsprozesse neuraler Netzwerke sammeln.

Die Zukunft der systemischen Neurowissenschaft hängt von der Entwicklung und Anwendung integrativer Methoden ab. Aufzeichnungen von einzelnen Zellen, umfangreiche Aufzeichnungen mit Elektroden- oder Tetrodenanordnungen, die Beobachtung von Aktionspotenzialen und von langsamen Hirnwellen, die bildgebenden Verfahren der Neurowissenschaften – all das muss eingesetzt werden, um herauszufinden, wie das Gehirn unterschiedliche Verhaltensweisen hervorruft. Dabei sind abbildende Techniken von wesentlicher Bedeutung. Hauptstützpfiler neuraler Abbildungsverfahren ist die funktionelle Kernspintomografie (fMRT). Ihr größter Vorteil besteht darin, dass sie Informationen zu weit verteilten Aktivitätsmustern liefern kann, während die Versuchstiere besondere Aufgaben ausführen. Ihre Nachteile – die begrenzte zeitliche und räumliche Auflösung sowie die Unfähigkeit des hämodynamischen Ersatzsignals, die eigentlichen neuronalen Ereignisse in punkto Stoffwechsel- und Blutströmungsreaktionen zu zeigen – können heute mit zeitgleichen elektrophysiologischen Aufzeichnungen von der Hirnrinde und anderen invasiven Techniken kompensiert werden.

Neuroanatomische kortiko-kortikale und kortiko-subkortikale Verbindungen wurden bislang hauptsächlich mit histologischen Methoden untersucht, die fixiertes und behandeltes Gewebe für die Datenanalyse benötigen. Solche Methoden eignen sich nicht für Tiere in Langzeitstudien, wo Untersuchungsreihen zur Beobachtung eines ganzen Schaltkreises mit denselben Versuchstieren durchgeführt werden sollen.



Sichtbare MRT-Tracer, die in eine spezifische Gehirnregion infundiert und anterograd oder retrograd entlang des Axons transportiert werden, ermöglichen es, die Konnektivität am lebenden Tier zu untersuchen. In einer vor kurzem am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik durchgeführten MRT-Studie konnte mithilfe von Manganinjektionen ins Gehirn eine detaillierte Beschreibung der Spezifität und des Transfers dieser Substanz über Synapsen geliefert werden. Damit können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weit verzweigte neurale Netzwerke im lebenden Tier studieren.

Auch Erkenntnisse über die Konnektivität und die funktionelle Organisation können mithilfe der Kombination von MRT und elektrischer Mikrostimulation gewonnen werden. Letztere dient als wichtiges neurobiologisches Werkzeug zur Untersuchung der Repräsentation in der Fläche und der funktionellen Eigenschaften von Outputstrukturen des zentralen Nervensystems. In jüngerer Zeit wurde am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik eine neue Methode entwickelt, bei der diese Technik mit der funktionellen Kernspintomografie (fMRT) kombiniert wird, um die neurale Konnektivität im lebenden Tier detailliert zu beobachten.

#### Systemische Neurowissenschaft von morgen

Die geschilderten Beispiele sind die ersten Versuche, integrative Methoden in der systemischen Neurowissenschaft anzuwenden. Die zur Verfügung stehenden Techniken sind aber noch nicht ausgereift und einsatzfähig. Viel Entwicklungsarbeit und Tests sind noch notwendig, um neurowissenschaftliche Kenntnisse über die Beschreibung physiologischer Eigenschaften der unterschiedlichen Gehirn-

strukturen hinaus zu bringen. Noch viel Arbeit ist nötig, um aus der „Ära der Sammlung von Informationen“ in ein „Zeitalter des Wissens“ zu gelangen. Diese Forschungsarbeit kann nur von vielen kleinen Teams geleistet werden, von denen zwar jedes auf eine andere Technologie spezialisiert ist, aber deren Interesse auf den verschiedenen Aspekten derselben Fragen liegt. Hinzu kommt, dass die Verbindung aus Neurowissenschaft, Physik und Technik nicht die einzig wünschenswerte Kombination verschiedener Methoden darstellt.

© Fundació Gala-Salvador Dalí/VG Bild-Kunst



Mann oder sitzende Frau? Der Künstler spielt hier mit der Fähigkeit des Betrachters, ein und dieselbe Darstellung als zwei verschiedene Bilder auszulegen.

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt/Main
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für Psycholinguistik, Nijmegen

So können mit der regionalen Gen-Knockout-Technologie spezielle Tiere gezüchtet werden, in denen ein Gen in einem spezifischen Hirnareal eliminiert ist oder auch nur in einer speziellen Zellpopulation. Angewandt wird diese Technik momentan bei Mäusen, doch sind auch Knockouts höherer Säugetiere geplant und wurden schon versucht. In einer neueren Studie wurde gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, einen Mäusestamm zu schaffen, bei dem das Gen für den NMDA-Rezeptor nur in den pyramidalen CA1-Zellen des Hippocampus ausgeschaltet ist – in einem Hirnareal, das für das Raumgedächtnis dieser Spezies eine entscheidende Rolle spielt. Diese Technologie ist signifikant präziser als die erste Generation an Gen-Knockout-Experimenten. Für jene Experimente wurden Tiere mit einer speziellen genetischen Struktur herangezogen, bei denen ein spezifisches Gen im ganzen Körper vollständig eliminiert war, unabhängig vom Organ oder Zelltyp. Tiere mit spezifischen regionalen Defekten können in psychophysischen, elektrophysiologischen und bildgebenden Experimenten eingesetzt werden, um sowohl den Beitrag der eliminierten neuronalen Population besser zu verstehen, als auch die Reorganisationskapazität der übrigen Netzwerke beobachten zu können.

Diese Kombination aus Pharmakologie, Mikrostimulation und Abbildungsverfahren der Neurowissenschaft kann sich entscheidend auf klinische Anwendungen auswirken. Bei der tiefen Hirnstimulation (Deep Brain Stimulation, DBS) beispielsweise wird die Spitze einer Elektrode in das Gehirn eingeführt, und zwar in ein Areal, das die Bewegung kontrolliert. Bei den meisten Parkinson-Patienten bessert DBS viele Symptome. Sie können besser gehen und ihren

Alltag bewältigen. Doch dieser Mechanismus ist unzuverlässig. Es braucht mehr als Mikrostimulation, um die Areale herauszufinden, die aktiviert oder inaktiviert werden müssen, um das gewünschte Verhalten zu erreichen.

Ein anderes Beispiel interdisziplinärer Aktivität ist die Herstellung von in der MRT sichtbaren smarten Agenzien. Die smart-agent-Technologie nutzt die Konfigurationsveränderungen, die in Komplexliganden (Chelaten) in Anwesenheit anderer Ionen oder Moleküle auftreten. Konfigurationsveränderungen sind mit Veränderungen der Relaxivität assoziiert. Zurzeit stehen keine extrazellulären Agenzien zur Verfügung, um *in vivo* Konzentrationsveränderungen von Ionen oder Molekülen zu untersuchen, die am neuronalen Signalprozess beteiligt sind. Ihre Synthese und ihre Anwendung in der Neurowissenschaft könnte eine Revolution einleiten. Während sich das Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik momentan an die Synthese von Agenzien heranwagt, die gegenüber Veränderungen in der Konzentration kritischer Moleküle in den Signalbahnen sensibel sind, wäre für die Erzielung echter Fortschritte eine enge Zusammenarbeit zwischen Gruppen von Chemikern mit Biophysikern und Neurobiologen notwendig.

Um die beschriebenen Forschungsansätze in den kommenden Jahren voranzutreiben, wäre die Einrichtung eines integrativen Forschungszentrums nötig. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus unterschiedlichen Feldern wären dabei nicht nur fachlich gefordert, sondern auch im kommunikativen Bereich, um die einzelnen Forschungsprojekte und deren Ergebnisse abgleichen und vernetzen zu können.



Neue methodische Entwicklungen haben es in den vergangenen Jahren möglich gemacht, kognitive Leistungen und die zu Grunde liegenden Gehirnprozesse beim Menschen in immer engerem Zusammenhang zu untersuchen. Kognitive Prozesse wie Wahrnehmen, Verstehen, Erinnern, Denken oder Entscheiden werden seit jeher mit psychologischen Forschungsmethoden untersucht, die auf der experimentellen Analyse von Verhalten und Erleben beruhen. Sie haben inzwischen einen Verfeinerungsgrad erreicht, der es erlaubt, komplexe kognitive Leistungen in einzelne Teilprozesse zu zerlegen, sie zeitlich und funktional zu charakterisieren und daraus Rückschlüsse auf die Mechanismen zu ziehen, auf denen sie basieren. Spektakulärer noch sind die jüngsten methodischen Entwicklungen im Bereich der Hirnforschung: Bildgebende Verfahren, die auf der Registrierung elektrischer und magnetischer Begleiterscheinungen von Gehirnaktivität beruhen, erlauben es heute, das Gehirn bei der Erbringung kognitiver Leistungen zu beobachten und die räumliche und zeitliche Verteilung von Aktivierungsprozessen zu verfolgen (insbesondere EEG, MEG und fMRT). Sie werden ergänzt durch Interferenzmethoden, die umschriebene Gehirnprozesse gezielt stören können (TMS).

## NEUROKOGNITION: KOGNITIVE PROZESSE UND GEHIRNFUNKTIONEN DES MENSCHEN

Damit eröffnen sich für die Erforschung des Zusammenhangs zwischen kognitiven Leistungen und Gehirnprozessen faszinierende Perspektiven. Moderne neurokognitive Forschung beobachtet, wie kognitive Prozesse mit Prozessen im Gehirn zusammenhängen. Sie schafft damit eine neue empirische Basis für die Beantwortung der alten philosophischen Frage, wie geistige Vorgänge mit materiellen Prozessen im Gehirn einhergehen können.

### Neue Impulse für alte Fragen

In der Praxis muss diese abstrakte Frage natürlich in konkrete Forschungsfragen umgesetzt werden, die sich experimentell bearbeiten lassen. Dazu einige Beispiele:

### Gesichter erkennen

Gesichter bilden im Vergleich zu anderen dreidimensionalen Objekten wie etwa Stühlen eine ziemlich homogene Klasse. Dennoch können Menschen Gesichter gut voneinander unterscheiden. Wie kann nur anhand des Gesichtes das Geschlecht der Person festgestellt werden? Männer unterscheiden sich von Frauen durch eine größere Nase und ein kräftigeres Kinn. Allerdings kann es im Einzelfall auch umgekehrt sein. Benutzt unser Gehirn für so wichtige Entscheidungen perzeptuell zwei klar getrennte Kategorien

oder toleriert es einen fließenden Übergang? Zur Untersuchung dieser Frage wurden Versuchspersonen gemorphte Gesichter gezeigt, die kontinuierlich ein weibliches in ein männliches Gesicht überführen. Der Befund: Es gibt keine kategoriale Wahrnehmung für das Geschlecht, solange nur Gesichter zu beurteilen sind. Zwar kann von deutlich männlichen oder weiblichen Gesichtern das Geschlecht recht gut abgelesen werden, aber bei Androgynen ist dies nicht möglich. Anders als bei der Wahrnehmung von Sprache oder Farbe gibt es hier keine klare Kategorienbildung. Wenn jemand auf unbekannte Gesichter trifft, verlässt er sich offenbar auch noch auf andere Signale wie etwa Figur und/oder Kleidung.

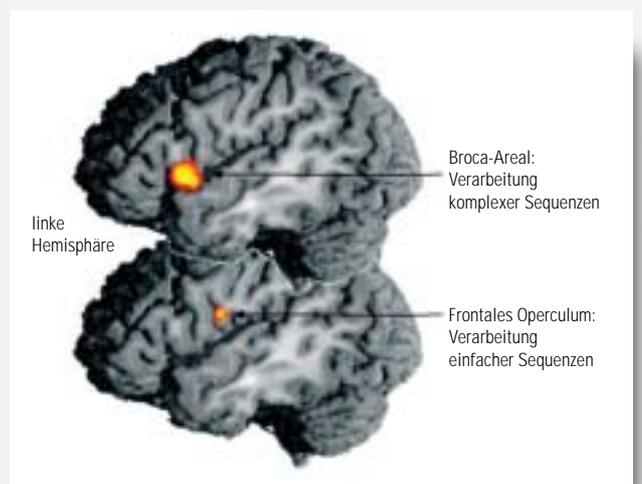
Heute ist die Landkarte der gesichterrelevanten Hirnzentren dank der funktionellen Kernspintomografie (fMRT) und der Elektroenzephalografie (EEG) recht gut bekannt. Trotzdem ist es umstritten, ob diese Zentren gesichterspezifisch sind oder ob sie eher Expertise-Zentren sind, die allgemein für die Unterscheidung von sehr ähnlichen

Das Bild einer Frau wurde mithilfe der Tübinger Morphing-Software schrittweise in ein männliches Gesicht verwandelt. Solche Morphing-Reihen wurden in psychophysischen Experimenten zur Kategorienbildung in der Gesichtserkennung eingesetzt. Sie lassen sich aber auch bei der Erstellung von Fahndungsfotos einsetzen, da weitere Charakteristika wie Alter oder ethnische Faktoren kontinuierlich verändert werden können.



MPI für biologische Kybernetik

Untersuchungen mit funktioneller Kernspintomografie zeigen, dass die Verarbeitung einfacher und komplexer syntaktischer Strukturen durch unterschiedliche Hirnareale unterstützt wird.



Objekten zuständig sind – also nicht nur speziell für Gesichter. Neue Untersuchungen mit animierten Gesichtern zeigen wichtige zusätzliche Einflüsse anderer Informationen etwa von Bewegung auf unsere Erkennungsleistung. Solche Erkenntnisse sind von großer Bedeutung für die Entwicklung effizienter bildbasierter Telekommunikation und für die Interpretation von Überwachungsvideos beispielsweise bei Banküberfällen.

### Sprache verstehen

Menschen unterscheiden sich von nichtmenschlichen Primaten durch ihre sprachlichen Fähigkeiten. Affen können zwar einfache lautliche Abfolgen lernen, nicht aber komplexe Sequenzen, bei denen hierarchische Strukturen eine Rolle spielen. Daher stellt sich die Frage, ob beim Menschen die Verarbeitung komplexer, hierarchisch strukturierter Abfolgen durch andere Hirnareale getragen wird als die Verarbeitung einfacher Abfolgen von Elementen. Seit langem ist bekannt, dass für die Verarbeitung komplexer Sprachstrukturen das Broca-Areal zuständig ist: Patienten mit Schädigung dieses Areals sprechen agrammatisch und haben Schwierigkeiten beim Verstehen grammatisch komplexer Strukturen, nicht aber beim Verstehen einfacher Sätze.

Könnte es sein, dass die Verarbeitung einfacher Abfolgen von Elementen nicht auf dieses Areal angewiesen ist, sondern durch andere Hirnstrukturen geleistet wird? Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren (fMRT) haben diese Vermutung bestätigt. Es zeigte sich nämlich, dass die Verarbeitung einfacher Sequenzen Aktivierungen im (phylogenetisch älteren) frontalen Operculum hervorruft, die Ver-

arbeitung komplexer Strukturen dagegen mit Aktivierungen im (phylogenetisch jüngeren) Broca-Areal einhergeht. Das macht verständlich, dass die einfachen Sequenzen, die beim Menschen den älteren Kortex aktivieren, auch von Affen gelernt und verarbeitet werden können, nicht jedoch die komplexen Strukturen, die beim Menschen das Broca-Areal aktivieren.

### Aufgaben teilen

Menschen erledigen viele Aufgaben arbeitsteilig: Sie bearbeiten Aufgaben, an denen auch andere mitwirken. Was macht es für einen Unterschied, ob Personen eine Aufgabe allein ausführen oder ob sie die gleiche Aufgabe als Teil einer Gesamtaufgabe zusammen mit anderen Menschen bearbeiten? Um dieser Frage nachzugehen, wurden Personen unter zwei Bedingungen untersucht: einzeln oder zu zweit. Sie hatten eine Reaktionsaufgabe zu bearbeiten, die unter beiden Bedingungen identisch war. Der jeweils dargebotene Reiz informierte die Versuchsteilnehmer darüber, wann sie zu reagieren hatten und wann nicht.

Die Ergebnisse zeigten eine Reihe von tiefgreifenden Unterschieden zwischen den beiden Bedingungen: Besonders beeindruckend waren die Unterschiede in den Durchgängen, in denen Personen nicht zu reagieren hatten – und deshalb auch keine Reaktionen auf Verhaltens-ebene gemessen werden konnten. Für diese Durchgänge zeigte sich im EEG ein markanter Unterschied in einer Komponente, die für Handlungskontrolle und Inhibition steht. Diese Komponente war in der Zweierbedingung wesentlich stärker ausgeprägt als in der Einzelbedingung. Die Ergebnisse haben weitreichende Konsequenzen für die



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI für biologische Kybernetik, Tübingen
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für Psycholinguistik, Nijmegen

kognitive Repräsentation arbeitsteiliger Prozesse. Sie zeigen, dass Personen in arbeitsteiligen Situationen nicht nur ihre eigene Aufgabe repräsentieren, sondern auch die Aufgaben ihrer Kooperationspartner.

**Entwicklungsperspektiven in der Max-Planck-Gesellschaft**  
Die Max-Planck-Gesellschaft verfügt über ein starkes Potenzial an neurokognitiver Forschung im Humanbereich – ein Potenzial, das in den letzten Jahren sogar gewachsen ist. Besondere Zentren bestehen am MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, für Hirnforschung, für Psycholinguistik, für Bildungsforschung und für biologische Kybernetik. Inhaltliche Schwerpunkte liegen hier in den Bereichen Sprache, Wahrnehmung sowie Handlung und exekutive Funktionen.

• **Neue Fragen.** Neben elementaren Basisfunktionen, die in kurzfristigen Prozessen und Leistungen ihren Niederschlag finden, rücken neuerdings auch komplexere kognitive Strukturen und Prozesse in den Blickpunkt der Forschung, die in langfristigen Lern- und Entwicklungsprozessen aufgebaut werden. Wie entwickelt sich menschliche Sprachfähigkeit, und welche Hirnstrukturen sind daran beteiligt? Welche Hirnstrukturen unterstützen das Erlernen von Zweitsprachen? Ferner: Wie hängt die Entwicklung von Lernfähigkeit und Intelligenz mit der Entwicklung des Gehirns zusammen, und wie weit lassen sich individuelle Unterschiede in kognitiven Fähigkeiten mit Unterschieden in Gehirnprozessen in Zusammenhang bringen? Wie weit können diese Unterschiede ihrerseits auf Unterschiede in der genetischen Ausstattung zurückgeführt werden? Diese Fragen, die die biologischen Grundlagen des langfristigen

Aufbaus von kognitiven Fähigkeiten betreffen, rücken an den genannten Instituten zunehmend in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit.

• **Neue Methoden.** Neurokognitive Forschung ist von hochkomplexen Technologien abhängig, die nicht schlüsselfertig bereitstehen, sondern sich ständig in Entwicklung und Weiterentwicklung befinden. Die damit verbundenen ingenieurwissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben können nur in unmittelbarem Kontakt mit der inhaltlichen Forschung gelöst werden, die sie unterstützen. Deshalb richten sich die Forschungsperspektiven der Institute nicht nur auf die Bearbeitung neuer Fragen, sondern auch auf die Entwicklung von Technologien, die ihre Bearbeitung ermöglichen. Das gilt für Technologien der Virtuellen Realität, mit denen kognitionswissenschaftliche Experimente zunehmend realitätsnah gestaltet werden. Und das gilt vor allem für Technologien im Bereich der funktionellen Kernspintomografie: Sie zielen darauf ab, Messverfahren zu entwickeln, die Aktivierungsprozesse im Gehirn in noch größerer räumlicher und zeitlicher Auflösung erfassen können als die bisher verfügbaren Methoden. Ein Durchbruch in diesem Bereich würde die neurokognitive Forschung um einen entscheidenden Schritt voranbringen.

Bei der psychischen Entwicklung des Menschen greifen biologische und kulturell-soziale Systeme ineinander. Die Herausbildung früher Verhaltenskompetenzen und die Ausreifung des Gehirns sind auf den Austausch mit der sozialen Umwelt angewiesen. Dabei ermöglicht es die Investition biologischen Potenzials, sich kulturelle Wissensbestände anzueignen. Im höheren Erwachsenenalter lässt das auf biologischen Faktoren beruhende Leistungsvermögen nach, während das auf angeeignetem Wissen basierende bis ins Alter stabil bleibt oder sogar wächst. Max-Planck-Institute untersuchen das Zusammenwirken kultureller und biologischer Systeme von der Embryogenese bis ins hohe Alter mit dem Ziel, Grundlagen der Persönlichkeit und Voraussetzungen für kompetentes Handeln zu erforschen. Zu den Schwerpunkten gehören die Suche nach Altersveränderungen im Zusammenhang zwischen Gehirn und Verhalten, die Optimierung geistiger und emotionaler Produktivität im Alter sowie die Rolle der Technologie in einer altersfreundlichen Gesellschaft.

## PSYCHISCHE ENTWICKLUNG DES MENSCHEN ÜBER DIE LEBENSSPANNE: PERSONALITÄT UND HANDLUNGSKOMPETENZ

### Gehirn und Verhalten sind voneinander abhängig

Die psychische Entwicklung des Menschen erfordert das Zusammenwirken von Biologie und Kultur über die gesamte Lebensspanne. Die in erster Linie biologisch bedingte Komponente der psychischen Entwicklung erreicht in frühen Lebensstadien ihren Höhepunkt und nimmt danach kontinuierlich ab. Dementsprechend nimmt der Bedarf an Kultur – die hier im weiteren Sinne verstanden wird und Kulturprodukte wie Medizin und Technologie einschließt – im Laufe des Erwachsenenalters zu. Zudem wird mit zunehmendem Alter ein größerer Einsatz an kulturellen Ressourcen benötigt, um ein vergleichbares Ergebnis zu erzielen.

Gehirn und Verhalten sind im Laufe der psychischen Entwicklung voneinander abhängig: Das Gehirn produziert Verhalten, und das Verhalten entwickelt das Gehirn. Die Unreife des Gehirns von Säuglingen, Kindern und sogar Jugendlichen ist Voraussetzung für die Konstruktion der Unterschiede und Gemeinsamkeiten menschlichen Verhaltens. Psychische Alterung wiederum ist ein komplexes Produkt vergangener und gegenwärtiger Kontakte und Auseinandersetzungen mit der Umwelt sowie alterungsbedingter neurophysiologischer Veränderungen.

Die Investition biologischen Potenzials in allgemein verbindliche Lerninhalte und personenspezifische Lernprozesse ermöglicht den langfristigen Aufbau mehr oder minder vernetzter Wissensbestände. Hierzu zählen zum Beispiel im allgemeinen Bereich der Erwerb der Muttersprache sowie die Schulbildung, im persönlichen Bereich hingegen berufliches Expertenwissen oder auch Wissen über grundsätzliche und schwierige Fragen der Lebensführung,

so genanntes Weisheitswissen. Im Gegensatz zu Leistungen, deren Höhe stark biologisch bestimmt ist, können wissensbasierte Leistungen bis in das späte Erwachsenenalter Stabilität und Zugewinn zeigen.

Das Wechselspiel zwischen den biologischen und kulturellen Komponenten der psychischen Entwicklung verändert sich also im Laufe des Lebens. Im Säuglings- und Kindesalter dient das sozial-kulturelle Umfeld der Entfaltung der biologischen Komponente. So hat die Vorliebe von Säuglingen für die von der Mutter während der Schwangerschaft gesprochene Sprache eine biologische Grundlage. Im Erwachsenenalter und Alter hingegen dienen der Erwerb und die Aufrechterhaltung von Wissen vermehrt dem Vermeiden oder Abschwächen negativer Folgen der biologischen Alterung. Bei der weiteren Erforschung von Altersunterschieden im Zusammenwirken von Biologie und Kultur werden die Themen Persönlichkeit und Handlungskompetenz eine Hauptrolle spielen. Einige Beispiele für Fragen, die beantwortet werden sollen:

### Die Entwicklung von Persönlichkeit und Lernpotenzialen

Was befähigt Menschen, sich als handelnde Personen und Subjekte ihrer eigenen Entwicklung zu konstruieren und Persönlichkeit zu entwickeln? Und in welcher Weise wirkt die Ausbildung von Persönlichkeit zurück auf die sozialen Institutionen, in denen sie sich vollzieht? Im Vordergrund steht hier die Frage, wie sich menschliche Persönlichkeit individualgeschichtlich ausbildet und was ihre Ausbildung oder deren Fehlschlagen für die Individuen und ihre soziale Umgebung bedeutet. Von besonderem Interesse ist die Funktion kultureller Normen und Vorstellungen für das Entstehen von Persönlichkeit.



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI für demografische Forschung, Rostock
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für evolutionäre Anthropologie, Leipzig
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt
- MPI für Informatik, Saarbrücken
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig und München
- MPI für Psycholinguistik, Nijmegen

MPI für Bildungsforschung



Elektrophysiologische Messungen mit Hilfe des Elektroenzephalogramms (EEG) ermöglichen die Erfassung von Altersunterschieden in neuronalen Korrelaten des Lernens. Sie besitzen eine hohe zeitliche Auflösung und sind besonders gut geeignet, um systemische Entwicklungsveränderungen der Hirnaktivität abzubilden.

Im Themenbereich „Verhalten und Gehirn während der Lebensspanne: Aktivierung von Lernpotenzialen“ geht es um die Beantwortung der Frage: Was verändert sich im Gehirn, wenn Menschen lernen und sich entwickeln? Trainingsstudien mit Kindern und älteren Erwachsenen sollen darüber Aufschluss geben, wie sich Höhe und neuronale Korrelate des Lernpotenzials über die Lebensspanne verändern. Forschungsschwerpunkt bilden hierbei die systemischen Veränderungen in der Beziehung zwischen Gehirn und Verhalten sowie die Aktivierung von Lernpotenzialen im Alter.

Was geschieht im Gehirn, wenn Personen miteinander in Kontakt treten? Viele soziale Aktivitäten mit grundlegender Bedeutung für die weitere psychische Entwicklung erfor-

dern eine besonders enge Verhaltensabstimmung zwischen den handelnden Personen – etwa die Koordination von Blickbewegungen und Lautäußerungen im frühen Mutter-Kind-Kontakt. Worin bestehen die neuronalen Voraussetzungen der zwischenmenschlichen Handlungskoordination, und wie entwickeln sich diese im Laufe des Lebens? Fragen, die unter anderem durch die bei mehreren Personen gleichzeitig stattfindende Ableitung elektrophysiologischer Signale beantwortet werden sollen.

Im Bereich „Informationstechnologie und Alter“ geht es um die Erforschung des Zusammenspiels von Biologie und Kultur bei der psychischen Entwicklung. Sie beschränkt sich nicht auf eine Zustandsbeschreibung, sondern dient auch der Suche nach gesellschaftlichen Veränderungen, die dieser förderlich sind. Der Erhalt und die Verbesserung der Lebensqualität insbesondere älterer Menschen durch den in das tägliche Leben eingepassten Gebrauch technologi-scher Hilfsmittel sind hier besonders dringlich und lohnend. Die Entwicklung derartiger Hilfsmittel erfordert sowohl fundierte Kenntnisse über Altersveränderungen in Wahrnehmung, Denken und Motorik als auch ein hohes Maß an informationstechnologischer Expertise. Institute aus allen Sektionen der Max-Planck-Gesellschaft beteiligen sich an dieser interdisziplinären Aufgabe.

## SOZIALE ORDNUNG IN EINER GLOBALEN WELT

Die rapide Ausbreitung gesellschaftlicher Strukturen über nationale Grenzen hinweg erzeugt ein krisenhaftes Bedürfnis nach neuen transnationalen Ordnungen. Der Prozess der Globalisierung verläuft schneller als die Herausbildung von Institutionen oberhalb des Nationalstaats, mit denen die neuen, über den Nationalstaat hinausreichenden sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Beziehungen geordnet und gesteuert werden könnten. Nationale Ordnungen bestehen im Rahmen der sich entwickelnden internationalen Regime fort, geraten aber unter starken Anpassungsdruck mit ungewissem Ausgang. Zwischen nationalen und internationa-

len Institutionen ergeben sich zahlreiche und vielfältige Spannungen. Die Integration der nationalen Gesellschaften in die entstehende Weltgesellschaft erscheint als Prozess der Angleichung ebenso wie der Differenzierung. Zugleich wächst als Folge internationaler Migration die interne Vielfalt der Nationalgesellschaften. Nicht nur auf globaler Ebene, auch innerhalb der immer weniger nach außen abschließbaren Nationalstaaten entstehen bisher nicht gekannte Probleme der sozialen Integration, die unter anderem in neuen Formen transnationaler Kriminalität und politischer Gewalt Ausdruck finden.



### SOZIALE UND PERSONALE INTEGRATION IN KULTURELL HETEROGENEN GESELLSCHAFTEN

109



### GLOBALISIERUNG: NATIONALSTAATEN IN DER WELTGESELLSCHAFT

111



### TERRORISMUS, KRIEG, POLITISCHE GEWALT

113

MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND BIOLOGISCHE VIELFALT

NEUE MATERIALIEN PRÄGEN DIE ZEITALTER

INFORMATION: TECHNIK, LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN EINER GLOBALEN WELT

MÄRKTE UND INSTITUTIONEN



Die Grenzen der reichen Länder Europas werden durchlässiger. Mit zunehmenden internationalen Wanderungsbewegungen werden traditionelle Formen sozialer Integration fragwürdig. Sie werden nicht zuletzt auch von vielen Zuwanderern zurückgewiesen, die ihre Bindungen an ihr Herkunftsland nicht aufgeben wollen. Dadurch wächst die kulturelle Heterogenität der europäischen Gesellschaften. Hierin liegen vielfältige Chancen, wie die Geschichte heterogener Gesellschaften zeigt. Zugleich entstehen aber auch sehr grundsätzliche Konflikte, unter anderem über den öffentlichen Umgang mit Religion. Politik und Recht müssen Antworten auf die neuartigen Chancen und Risiken kultureller Heterogenität finden, wenn der soziale Zusammenhalt gesichert werden soll.

## SOZIALE UND PERSONALE INTEGRATION IN KULTURELL HETEROGENEN GESELLSCHAFTEN

**Gleiche Bürgerrechte für alle Bewohner des Staates**  
Die nationalstaatlich organisierten modernen Gesellschaften des Westens sind in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kulturell heterogener geworden. Ursache waren zunächst die von den großen Kriegen und ethnischen Säuberungen ausgelösten Flüchtlingsbewegungen. Später kam eine wachsende Arbeits- und Wohlstandsmigration aus der Peripherie in die Zentren der sich entwickelnden Weltgesellschaft hinzu. Die Nationalgesellschaften Europas hängen jedoch seit dem 19. Jahrhundert dem Ideal einer einheitlichen Nationalkultur an und definieren von hier aus den Begriff des Staatsvolks. Migration wurde und wird deshalb häufig als Bedrohung mühsam errungener Einheit erlebt. Bei allen Unterschieden war die Einwanderungspolitik der Aufnahmeländer bis weit in die 1980er-Jahre von dem Bestreben geleitet, das Ausmaß der Einwanderung so zu begrenzen, dass eine Assimilierung der Immigranten in die jeweilige Nationalkultur noch möglich und deren Homogenität und Kontinuität damit gesichert erschien.

Mit welchen Mitteln die kulturelle Eingliederung von Zuwanderern zu erreichen ist, darüber gingen und gehen die Auffassungen der Regierungen weit auseinander. Dennoch bildete sich zumindest in Westeuropa ein liberaler Konsens dahingehend heraus, dass Einwanderer Anspruch auf Schutz vor ethnischer Diskriminierung und auf freie Ausübung ihrer Religion haben sollten. Statt auf Assimilationsziele zielte die Politik zunehmend auf Integration in eine sich selbst pluralistisch umdefinierende Zivilgesellschaft, in einem Spektrum zwischen passiver Toleranz und aktiver Förderung von Multikulturalität um ihrer selbst willen. Gleiche Bürgerrechte für alle Bewohner des staatlichen Territoriums sollten innerhalb eines säkularisierten Staats-

verständnisses ein Integrationsangebot darstellen, das für die eingewessene Bevölkerung akzeptabel und für die Zuwanderer attraktiv sein würde.

**Religiöse und ethnische Konflikte treten auf**  
Diese Erwartung ist heute auf mehrfache Weise in eine Krise geraten. Politischer Widerstand der einheimischen Bevölkerung, nicht selten artikuliert von rechtsradikalen Bewegungen und Parteien, ist nur eine Erscheinungsform der neuen, durch Migration ausgelösten gesellschaftlichen Konflikte. Eine andere ist die vielfältige Diskriminierung von Einwanderern im Bildungssystem und im Arbeitsmarkt, die sich auch durch Gleichstellungsgesetze – wenn diese denn überhaupt politisch durchsetzbar sind – kaum beheben lässt. Neben ethnischen treten religiöse Konflikte auf. Dies gilt gerade in den säkularisierten demokratischen Gesellschaften Westeuropas, in denen die islamistische Weigerung, Glauben als Privatsache zu behandeln, bewährte Friedensformeln im Verhältnis zwischen Staat und Religion in Frage stellt. Zugleich verschwindet die Möglichkeit, Einwanderung so zu beschränken, dass die Neuankömmlinge im Alltag der aufnehmenden Gesellschaft nur selten wahrgenommen werden. Dies liegt nicht nur an den immer poröser werdenden Grenzen, sondern auch an der demografischen Struktur der westlichen Gesellschaften, die auf Zuwanderung von Arbeitskräften angewiesen sind, wenn sie ihren Wohlstand erhalten wollen.

Andere Herausforderungen für eine liberale Integrationspolitik erwachsen durch die Einwanderer selber. Noch weniger als die USA sind die europäischen Gesellschaften zu einem *melting pot* geworden. Statt mittel- und langfristiger Integration zeichnet sich nicht selten eine ethnische und

religiöse Segregation ab, die nur teilweise als Reaktion auf Diskriminierung zu erklären ist. Eine Ursache scheint zu sein, dass Migranten heute aufgrund moderner Kommunikationsmittel (Flugreisen, Satellitenfernsehen) viel besser als in der Vergangenheit an der ethnischen und religiösen Identität ihrer Herkunftsgesellschaften festhalten können. Damit entstehen transnationale Mischidentitäten, deren Träger sich mehr als einer Gesellschaft zurechnen wollen. Ein Ausdruck für das veränderte Verhältnis zwischen Gesellschaften und ihren Mitgliedern im Zeitalter der Globalisierung ist die wachsende Verbreitung mehrfacher Staatsangehörigkeit.

#### Konflikte über Wert und Wesen von Toleranz

Es ist jedoch nicht nur die Herausbildung hybrider transnationaler Identitäten, die die kulturelle Heterogenität vor allem der westeuropäischen Gesellschaften erhöht. Zusätzlich erweist sich die in Westeuropa etablierte Lösung religiöser Konflikte durch Verdrängung der Religion aus der öffentlichen Sphäre häufig als hilflos gegenüber fundamentalistischen religiösen Orientierungen. Für diese nämlich erscheint eben jene Beschneidung des universellen Geltungsanspruchs religiöser Vorschriften, die im Westen lange Zeit Grundlage sozialen Friedens war, als Widerstand rechtfertigende Unterdrückung. Die sich hier ergebenden Wertkonflikte sind durch Toleranz deshalb schwer zu lösen, weil es Konflikte über Wert und Wesen von Toleranz selbst sind. Die Auseinandersetzungen über das Kopftuch, die in Deutschland und Frankreich die Parlamente und Gerichte beschäftigen, sind nur ein Anzeichen unter vielen dafür, dass die europäischen Gesellschaften noch keine überzeugende Antwort auf die grundlegenden Probleme sozialer Integration gefunden haben, die sich aus ihrer unvermeidlich wachsenden sozialen Heterogenität ergeben und weiter ergeben werden.

© Ullstein Bilderdienst



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für ausländisches und internationales Strafrecht, Freiburg
- MPI für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für europäische Rechtsgeschichte, Frankfurt/Main
- MPI für Geschichte, Göttingen
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln
- Bibliotheca Hertziana – MPI für Kunstgeschichte, Rom

Die sich verändernde Zusammensetzung der entwickelten europäischen Gesellschaften wirft eine Vielzahl von empirischen, analytischen und normativen Forschungsfragen auf. Deren Bearbeitung erfordert gemeinsame Anstrengungen von Historikern, Psychologen, Soziologen, Demografen, Politikwissenschaftlern und Rechtswissenschaftlern. Zu den einschlägigen Themen, die sich die Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftliche Sektion auch in Antwort auf den Bericht der Präsidentenkommission „Sozialwissenschaften in der Max-Planck-Gesellschaft“ vorgenommen hat, gehören:

- Politik und soziale Integration in toleranten Gesellschaften der Vergangenheit;
- das kreative Potenzial kultureller Heterogenität in Vergangenheit und Gegenwart;
- die Entwicklung personaler Identität in heterogenen Gesellschaften und transnationalen Gemeinschaften;
- das Verhältnis von Religion und Ethnizität bei der Konstituierung und Mobilisierung sozialer Minderheiten in europäischen Gesellschaften;
- der Gestaltwandel der Religion in modernen Gesellschaften als Folge von Säkularisierung einerseits und Individualisierung, Fragmentierung und Pluralisierung religiöser Bindungen andererseits;
- Formen und Voraussetzungen erfolgreicher Anti-Diskriminierungsgesetzgebung in Europa und Nordamerika;
- die Auswirkungen von Einwanderung auf Art und Ausmaß wohlfahrtsstaatlicher Politik (einschließlich der Bildungspolitik) und sozialer Solidarität;
- die Auswirkungen zunehmender sozialer, kultureller, religiöser und ökonomischer Heterogenität auf die europäischen Bevölkerungsentwicklungen;
- die Organisierung ethnischer und religiöser Minderheiten und die Institutionalisierung von Vertretungsrechten im politischen System parlamentarischer Demokratien; das Verhältnis von Gruppenrechten zu individuellen Bürger- und Menschenrechten; die Struktur moderner Gesellschaften als *communities of communities*.



Globalisierung und Internationalisierung führen zu neuartigen Formen weltweiter Verflechtung und bewirken sowohl Angleichung als auch Differenzierung zwischen nationalen Gesellschaften. Zugleich erzwingen sie tiefgehende Veränderungen in Struktur und Funktion von Politik und Recht in den bestehenden Nationalstaaten. Ein Beispiel ist die europäische Integration mit ihrem Wechselspiel zwischen der Herausbildung neuer supranationaler Ordnungen und der oft schmerzhaften Anpassung nationaler Institutionen. Zahlreiche Max-Planck-Institute befassen sich mit den Folgen und Voraussetzungen dieser Entwicklung. Zu den Forschungsthemen gehören die Reform nationaler Wohlfahrtsstaaten, die Funktionsbedingungen internationaler Märkte, die Europäisierung des Privatrechts, Fragen der sozialen Sicherung und politischen Stabilität in einer globalisierten Ökonomie, die Bevölkerungsentwicklung in Europa in einem sich wandelnden politischen Umfeld sowie die Funktionsfähigkeit von nationalstaatlich organisierter Demokratie in einer internationalisierten Wirtschaft.

## GLOBALISIERUNG: NATIONALSTAATEN IN DER WELTGESELLSCHAFT

### **Globalisierung wirkt sich auf Recht und Politik aus**

Die Herausbildung einer Weltgesellschaft hat nicht erst am Ende des 20. Jahrhunderts begonnen. Sie reicht bis in die Zeit der Entdeckungen und der Entstehung der spanischen und britischen Weltreiche zurück. Auch die Ausbreitung des Nationalstaats als politische Organisationsform war Teil des Globalisierungsprozesses. Heute wird dieser durch technische Fortschritte bei Verkehr und Kommunikation weiter vorangetrieben. Dadurch wird die wirtschaftliche und politische Verflechtung zwischen den Nationen immer enger. Eine neue internationale Arbeitsteilung ist etwa in der Autoindustrie mit ihrem globalen, alle fünf Kontinente umspannenden Produktionssystem entstanden. Zwischen den zunehmend verflochtenen nationalen Gesellschaften hat sich eine komplexe Dynamik von Angleichung und Differenzierung entwickelt, die zu einem Hauptthema der modernen Politikwissenschaft und Soziologie geworden ist.

### **Die Globalisierung hat weitreichende Auswirkungen auf Politik und Recht.**

Als Folge der beschleunigten Internationalisierung haben besonders in Europa die Wechselwirkungen zwischen den nationalen Systemen rapide zugenommen. In Reaktion darauf kam es in manchen Bereichen zu supranationalen Regelungen, in anderen zu Selbstkoordination oder Konkurrenz zwischen nationalen Ordnungen und Regelungssystemen nichtstaatlicher Art und in wieder anderen zur Verlagerung von Regelungskompetenzen auf Einrichtungen unterhalb des Nationalstaats. Problemlösungsfähigkeit und Legitimität der neu entstandenen rechtlichen und politischen Regelungssysteme waren in den vergangenen Jahren Thema eines interdisziplinären Kooperationsprojekts von

Instituten der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftlichen Sektion. Nach Abschluss der ersten Phase soll es in erweiterter Form fortgeführt werden.

Internationalisierung und Globalisierung stellen weitweite soziale Beziehungen her, die sich zunehmend nationalstaatlicher Steuerung entziehen. Märkte und andere nichtstaatliche Ordnungen gewinnen deshalb an Bedeutung. Internationalisierung ist in vielen Bereichen gleichbedeutend mit Liberalisierung oder gar Entstaatlichung. Dementsprechend befassen sich die Rechts- und Sozialwissenschaften heute mehr als in der Vergangenheit mit Funktionsweise und Funktionsvoraussetzungen von Märkten und mit der Fähigkeit nationaler Rechtsordnungen, sich auf die gewachsene Bedeutung transnationaler Rechtsverhältnisse einzustellen. Zentrale Probleme der Forschung sind, ob die neuartigen internationalen Ordnungen die Erstellung notwendiger Gemeinschaftsgüter (saubere Luft, Biodiversität, die Integrität der Ozonschicht) zu sichern vermögen. Ebenfalls wird gefragt, welche Rolle dem Nationalstaat in Zukunft überhaupt noch zukommen kann und soll. Dies ist deshalb von großer Bedeutung, weil der Nationalstaat auf absehbare Zeit der wichtigste, wenn nicht gar einzige Träger demokratischer Legitimation bleiben wird. Von ebenso großer Bedeutung wie die Herausbildung transnationaler Ordnungen ist deshalb die gleichzeitig stattfindende Transformation des Nationalstaats im Prozess der Internationalisierung.

### **Rasche Änderung des internationalen Kontexts**

Die Öffnung der nationalen Gesellschaften verschafft verschiedenen sozialen Gruppen unterschiedlich große zusätzliche Mobilitätschancen und verstärkt Prozesse der

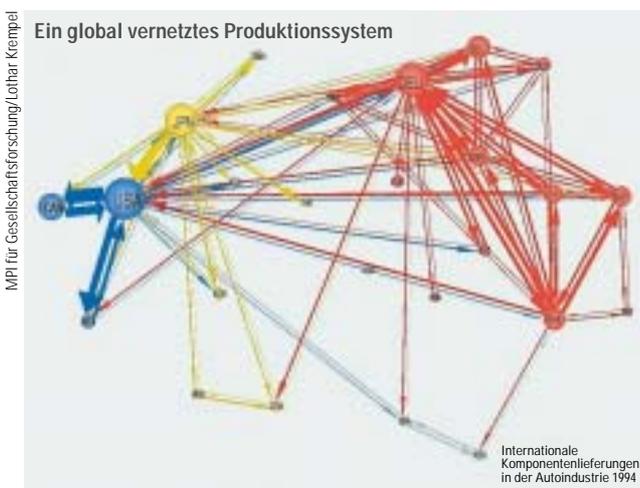
#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg
- MPI für ausländisches und internationales Strafrecht, Freiburg
- MPI für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für europäische Rechtsgeschichte, Frankfurt/Main
- MPI für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht, München
- MPI für Geschichte, Göttingen
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln

Diversifikation nationaler Bevölkerungsentwicklungen in Europa. Damit ändert sie die Machtverhältnisse und Stabilitätsbedingungen innerhalb der bestehenden politischen Systeme. Ähnliche Auswirkungen kann die Tatsache haben, dass auf internationaler Ebene Deregulierung (negative Integration) leichter zu erreichen sein scheint als die Ersetzung nationaler durch internationale Regelungen (positive Integration). Zugleich steigert Internationalisierung die Komplexität nationaler Politik erheblich, deren Akteure mit zusätzlichen strategischen Möglichkeiten und Einschränkungen jenseits der nationalen Grenzen zurecht-

kommen müssen (Mehrebenenpolitik). Auch wirft sie die Frage auf, ob und in welchem Ausmaß traditionelle nationale Mechanismen der sozialen Absicherung gegen die Risiken des Marktes auf internationaler Ebene wiederhergestellt werden können oder sollen.

Insgesamt wird die Politik der entwickelten demokratischen Gesellschaften Europas und Amerikas heute zunehmend von der Notwendigkeit bestimmt, nationale Institutionen an die Ansprüche eines sich rasch ändernden internationalen Kontexts anzupassen. Dabei geht es um verschärfte Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Legitimität innerstaatlicher Ordnungen, aber auch um die Nutzung neuer Möglichkeiten für Prosperität und Wachstum. Vor allem kleinere Nationalstaaten setzen auf eine Politik der Spezialisierung, auf lokale komparative Vorteile im Rahmen einer weltweiten internationalen Arbeitsteilung. Aktive Anpassung an eine global integrierte Wirtschaft, die immer weniger als Summe grundsätzlich voneinander unabhängiger Volkswirtschaften aufgefasst werden kann, erfordert oft tiefgehende Eingriffe in gewachsene Systeme der sozialen Sicherung, der Regulierung des Arbeitsmarkts, der Bildung und Ausbildung, der Finanzierung öffentlicher Aufgaben, der Corporate Governance und der Regulierung von Unternehmen des Banken- und Finanzsystems. Diese Eingriffe haben Auswirkungen auf die Bevölkerungsentwicklungen, die ihrerseits wiederum die Handlungspotenziale von Nationalstaaten beeinflussen. Zu den zentralen Themen der Rechts- und Sozialwissenschaftler in der Sektion in den kommenden Jahren wird gehören, wie derartige Umbauprozesse ohne stabilitätsgefährdende Verluste an demokratischer Legitimität und sozialer Integration bewältigt werden können.



Zu den am stärksten internationalisierten Wirtschaftszweigen gehört die Automobilindustrie. Global Sourcing verknüpft Hersteller in allen fünf Kontinenten zu einem weltweiten Produktionssystem.



Risiken und Kontrolle von Terrorismus, organisierter Kriminalität und Verbrechen im Krieg sind zentrale Themen einer neuen Sicherheitsdebatte. Von besonderem Interesse ist die Unterscheidung des Terrorismus von anderen Kriminalitäts- und Gewaltformen. Dabei geht es um die Transnationalität von Räumen, Zielen und Konfliktlinien des Terrorismus, die Organisation von Kapitalbildung im weitesten Sinne und die Einordnung unterschiedlicher Gewaltformen.

## TERRORISMUS, KRIEG, POLITISCHE GEWALT

### Terrorismus als neue Form des Krieges

Terrorismus, Krieg und politische Gewalt als gesellschaftliche Herausforderungen werden im 21. Jahrhundert neu definiert. Dieser Definitionsprozess ist Teil einer neuen Sicherheitsdebatte. Zentrale Themen sind Terrorismus, organisierte Kriminalität und Verbrechen im Krieg. Dabei verschwimmen die alten Unterscheidungen von innerer und äußerer Sicherheit, Krieg und Verbrechen, Prävention und Repression, Polizei und Militär, Geheimdienst und Polizei sowie von Krieg und Frieden insgesamt. Als Folge stellen sich gemeinsame Grundlagenfragen der Sozial- und Verhaltens-, Rechts- und Kulturwissenschaften aufs Neue.

Der Wandel zentraler gesellschaftlicher Unterscheidungen in der neuen Sicherheitsdebatte wird besonders am Terrorismus deutlich. Risiken und Kontrolle des Terrorismus werden in den nächsten Jahren die Sicherheitsdebatte dominieren. Dabei geht es insbesondere darum, Terrorismus von anderen Formen der Kriminalität zu unterscheiden und ihn als neue Form des Krieges oder als eigenständige Gewaltform zu definieren. Ein möglicher Zugang hierzu ist die Globalisierungsdebatte, insbesondere die Untersuchung transnationaler Räume, Zielsetzungen und Organisationsformen.

### Transnationale Gewalt

Die zunehmende Mobilität von Menschen und die Verdichtung grenzüberschreitender Kommunikation führen zu einem nationalstaatlichen Kontrollverlust. Zusammen mit weltweiten sozialen Beziehungen entstehen transnationale soziale Räume, in denen sich Terroristen bewegen und übernationale Ziele verfolgen, die sich vor allem ethnisch und religiös definieren. Die globalen Konfliktlinien des Ter-

rorismus verlaufen nicht mehr entlang von geografischen Grenzen, Nationen oder politischen Blöcken. Die Transnationalität der Räume und Ziele des Terrorismus verweist auf seine Organisation. Für die Organisation in transnationalen Räumen wird besonders das Netzwerkmodell diskutiert. Dieses taucht auch bei einem weiteren Thema der neuen Sicherheitsdebatte auf, der transnational organisierten Kriminalität. Die Unterscheidung von Terrorismus und organisierter Kriminalität verläuft entlang von Gemeinsamkeiten und Unterschieden der Ziele sowie der Organisation von Kapitalbildung, insbesondere von wirtschaftlichem,



Den Terrorismus im Blick: Die Komplexität eines zentralen Themas unserer Gesellschaft aus unterschiedlichen Perspektiven.

© corbis

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für ausländisches und internationales Strafrecht, Freiburg
- MPI für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg
- MPI für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für europäische Rechtsgeschichte, Frankfurt/Main
- MPI für Geschichte, Göttingen
- MPI für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht, München
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln

Human- und Sozialkapital (der Mobilisierung wirtschaftlicher Ressourcen, der Entwicklung des erforderlichen Know-hows sowie des Aufbaus unterstützender sozialer Netzwerke).

#### Entgrenzung von gewalttätigen Konflikten

Schließlich werfen die Transnationalität der Ziele und die Globalität der Konfliktlinien des Terrorismus die Frage nach der Gewaltform auf. Geplante und organisierte politische Gewalt gegen einen als Feind definierten Anderen ist ein Merkmal von Krieg – soweit Gewalt einen Konflikt

über Bedingungen und Folgen staatlicher Territorialität entscheiden soll. Stehen Letztere nicht im Vordergrund, sondern verlaufen die Konfliktlinien quer zu staatlichen Abgrenzungen, ergeben sich neue Fragen nach der Entgrenzung gewalttätiger Konflikte, den Risiken staatlich unkontrollierbarer Gewalt und ihrer Kontrolle durch Konfrontation mit Gewalt.

Die Institute der Max-Planck-Gesellschaft bieten eine ideale interdisziplinäre Plattform zur Behandlung der Fragestellungen der neuen Sicherheitsdebatte. Zahlreiche Max-Planck-Institute forschen zu Fragen, die für die Bedingungen und Folgen von Krieg und politischer Gewalt relevant sind. Die Rechtswissenschaften untersuchen die formelle Kontrolle von politischer Gewalt und Krieg. Dabei interessieren Funktion und Gestaltungspotenzial des Friedenssicherungsrechts, des internationalen Menschenrechtsschutzes, des humanitären Völkerrechts, des internationalen Strafrechts und des Wirtschaftsstrafrechts. Die Sozial- und Verhaltenswissenschaften arbeiten über die Unterscheidung und Einordnung von Konflikten und Konflikt Risiken, die Organisationsformen von Terrorismus und organisierter Kriminalität, den Umgang mit Gewalt in modernen Gesellschaften sowie die ethnologischen Bedingungen und Folgen von Konflikten und Konfliktregulierung. Die historischen Kulturwissenschaften und die Rechtsgeschichte untersuchen Kontinuitäten und Diskontinuitäten der Kontrolle von politischer Gewalt und Krieg. Hier interessieren insbesondere die Transformation des Religiösen, der Werte- und Institutionenwandel sowie Fragen der historischen Anthropologie von Religionskonflikten, Gewalt und Krieg.



Den Anderen zum Feind: Verbrannte Bücher nach einem terroristischen Anschlag auf das Französische Kulturzentrum in Amman, Jordanien.

## MÄRKTE UND INSTITUTIONEN

Das Ende planwirtschaftlich geführter Volkswirtschaften in den 1990er-Jahren und der Erfolg der marktwirtschaftlichen Industrieländer ließen den Markt als natürlichen und selbstverständlichen wirtschaftlichen Steuerungsmechanismus erscheinen. Tatsächlich aber können Märkte nur unter Rahmenbedingungen funktionieren, die sich zumeist einer raschen Verfügbarkeit entziehen. Zu diesen gehören wirksame und effiziente Rechtsordnungen und staatliche Strukturen, auf deren Fairness und Wirksamkeit die am Markt Handelnden aufgrund langjähriger Erfahrung vertrauen können. Außerdem eine Kultur, in der sich Individuen als eigenverantwortlich handelnd begreifen. In dieses dynamische Dreieck von Markt, Recht und Kultur brachte

die vom weltweiten Sieg der Marktwirtschaft vorangetriebene Globalisierung eine neue internationale und interkulturelle Komplexität. Anders als zuvor in national und regional begrenzten Märkten konkurrieren jetzt nicht mehr nur Waren um Käufer, sondern Systeme von Rahmenbedingungen mit anderen Systemen von Rahmenbedingungen. Mehrere Institute der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftlichen Sektion der Max-Planck-Gesellschaft beschäftigen sich mit der Erforschung des Ineinandergreifens von Markt, Recht und Kultur. Sie leisten damit einen Beitrag zum Verständnis der Mechanismen von Märkten, die eine effiziente Verteilung von Ressourcen und damit nationalen und globalen Wohlstand bewirken.

### DIE SICHTBAREN UND UNSICHTBAREN VORAUSSETZUNGEN DER UNSICHTBAREN HAND

116



### INSTITUTIONEN FÜR DEN *HOMO SAPIENS*

119



### EIGENTUMS- UND WETTBEWERBSORDNUNGEN ALS STRUKTURELLE VORAUSSETZUNG WIRTSCHAFTLICHER ENTWICKLUNG

122



MIT DEM URKNALL ANFANGEN

RAUMSCHIFF ERDE

EVOLUTION UND  
BIOLOGISCHE VIELFALTNEUE MATERIALIEN PRÄGEN  
DIE ZEITALTERINFORMATION: TECHNIK,  
LEBEN UND KULTUR

THEORIE UND MODELLIERUNG

BIOLOGISCHE STRUKTUREN

GESUNDHEIT

ALTERN: BIOLOGIE UND KULTUR

KOMPLEXES NETZWERK GEHIRN

SOZIALE ORDNUNG IN  
EINER GLOBALEN WELTMÄRKTE UND  
INSTITUTIONEN

Märkte steuern Verhalten von unsichtbarer Hand. Die Summe der individuellen Egoismen ist das gemeine Wohl. Die Bürger der westlichen Industrienationen haben sich an diese paradox klingenden Sätze gewöhnt. Sie sehen ja täglich, dass es funktioniert. Und sie haben gesehen, dass die Zentralverwaltungswirtschaften kläglich gescheitert sind. Doch in diesen Staaten funktioniert das westliche Rezept einstweilen viel weniger gut. Offensichtlich sind die einfachen Erklärungen für die Leistungsfähigkeit von Märkten zu simpel. Die unsichtbare Hand hat viel mehr sichtbare und unsichtbare Voraussetzungen.

## DIE SICHTBAREN UND UNSICHTBAREN VORAUSSETZUNGEN DER UNSICHTBAREN HAND

### Lebensbereiche öffnen sich der Logik des Marktes

Märkte funktionieren. In den modernen Industriegesellschaften überrascht das niemanden mehr. Adam Smiths Metapher von der unsichtbaren Hand des Marktes ist zu einem Gemeinplatz geworden. Auf Märkten wandern knappe Güter zu dem, der den besten Gebrauch von ihnen macht, und zwar treffsicherer, schneller und verlässlicher, als jeder Kopf dies planen könnte. Märkte befördern Innovation. Durch beides wächst der Kuchen beständig, von dem alle ein Stück haben möchten. Kein Käufer braucht sich nach einem Hersteller oder Händler zu richten. Wer diskriminieren will, muss dafür durch den Verlust von Einkommen bezahlen. Herrschaft und Haftung liegen in einer Hand. Wirtschaftliche Macht ist stets prekär. Der Wettbewerb ist das genialste Entmachtungsinstrument der Geschichte. Er schützt auch den Staat vor der Vereinnahmung durch gut organisierte Private.

So anziehend wirkte der Markt im Vergleich zum sozialistischen Plan, dass der Ostblock daran zerbrochen ist. Im Westen werden immer mehr Lebensbereiche der Logik des Marktes geöffnet. Bei den Medien und den Infrastrukturnetzen ist der Wandel bereits vollzogen. Bei der Universitätsausbildung, wissenschaftlichen Leistungen, Organen für die Transplantation sowie der Betreuung von Kindern und alten Menschen dagegen ist die Kommerzialisierung lebhaft umstritten. Bei solchem Streit geht es um ethische und soziale Fragen, aber auch darum, was der Markt vermag. Genauer: unter welchen Voraussetzungen und mit welchen Konsequenzen die unsichtbare Hand ihre Wirkung tun kann. Die sozialen, politischen und rechtlichen Voraussetzungen des Funktionierens moderner Marktwirtschaften sind Gegenstand wirtschaftssoziologischer, poli-

tikwissenschaftlicher, regulierungstheoretischer und juristischer Forschung. An ihr sind zahlreiche Institute der Geistes-, Sozial- und Humanwissenschaftlichen Sektion beteiligt.

### Voraussetzungen für das Funktionieren von Märkten sind bekannt

Manche Voraussetzungen für das Funktionieren von Märkten sind gerade in Deutschland seit mehr als einem halben Jahrhundert recht gut bekannt. Denn Deutschland ist das Mutterland des Ordoliberalismus. Er hat stets auf zwei Dingen bestanden: Märkte brauchen den institutionellen Rahmen des Privatrechts, und sie steuern wirtschaftliches Handeln nur, wenn der Wettbewerb funktioniert. Auf dieser Einsicht beruht das Kartellrecht. Und die ökonomische Wohlfahrtstheorie macht deutlich, bei welchen (Gemeinschafts-)Gütern Märkte versagen. Darauf reagiert das öffentliche Recht, etwa das Umweltrecht. Bei genauerem Hinsehen sind jedoch auch hier viele Fragen offen. Wo genau verläuft die Grenze zwischen der Einrichtung und der Korrektur von Märkten? Sind Verschmutzungszertifikate Institutionen der Privatrechtsgesellschaft oder staatliche Regulierungsinstrumente? Was heißt funktionsfähiger Wettbewerb, wenn ein Gut umso wertvoller wird, je mehr Nachfrager es nutzen? In anderen Worten: Wie integriert man dynamische Netzeffekte in das Kartellrecht? Noch weniger Klarheit besteht über das, was im Begriff des Marktes schon immer impliziert ist.

Die befreiten Gesellschaften im Osten Europas sind durch die Marktwirtschaft nicht über Nacht wohlhabend geworden. Der schnelle Import erfolgreicher westlicher Institutionen hat allein nicht gereicht. Sicher braucht

Wachstum Zeit, und auf das Rechtssystem ist in diesen Ländern nicht immer Verlass. Hinzu kommt aber, dass Märkte nur funktionieren, wenn Anbieter und Nachfrager auf Preissignale reagieren. Dies erfordert eine Wirtschaftskultur, die nicht selbstverständlich ist. Der Kunde muss erst lernen, dass er König ist. Und die Produzenten müssen lernen, unausgesprochene Wünsche ihrer Kunden in Produkte zu verwandeln. Ebenso müssen sie lernen, wer eigentlich ihre Konkurrenten sind. Sobald Produkte nicht mehr ganz einfach sind, versteht sich das nicht von selbst.

Die Definition des Marktes bedarf gemeinsamer Anstrengungen derer, die später gegeneinander antreten. Vor allem aber: Anbieter und Nachfrager müssen bereit sein, sich auf den Markt zu verlassen. Das ist eine riskante Angelegenheit. Anbieter müssen oft im Vorhinein hohe Investitionen tätigen, die sich erst in langen Zeiträumen rentieren. Gibt es dann noch eine Nachfrage nach ihren Produkten? Und Nachfrager verzichten in dem Maße auf Autarkie, wie sie sich auf marktwirtschaftliche Arbeitsteilung einlassen. Der Ausfall eines Kraftwerks kann ganz New York lahm legen. Wer einen Kredit aufnimmt, um seine Wünsche heute schon zu befriedigen, vertraut auf zukünftiges Einkommen. Für den, der eine Lebensversicherung abschließt, beruht der Wohlstand im Alter auf nicht mehr als einem (allerdings rechtlich bindenden) Versprechen. Vertrauen ist in einer Marktwirtschaft also zwingend erforderlich. In den reichen Industrienationen ist es hoch entwickelt. Aber wie ist es entstanden? Welche staatlichen oder privaten Handlungen und Institutionen stützen es? Durch welche Handlungen oder Entwicklungen wäre es gefährdet? Wie kann es in den neuen Marktwirtschaften begründet werden?



Adam Smith und die unsichtbare Hand des Marktes.

### Der Markt sieht nur auf das Ergebnis

Märkte bieten Chancen und sind zugleich voller Risiken. In einer Marktwirtschaft geht es vielen besser, aber nicht jedem. Ein Unternehmen kann auf das falsche Pferd setzen und in Konkurs gehen. Das trifft dann auch die Arbeitnehmer und deren Familien. Der Markt sieht nur auf das Ergebnis. Dass mangelnde Leistung unverschuldet sein kann, zählt nicht. Nicht selten mutet das Recht in marktwirtschaftlichen Staaten Opfer nach dem Zufallsprinzip zu. Gegenwärtig werden die Betroffenen zum Teil von den sozialen Sicherungssystemen aufgefangen. Aber diese Sicherungen sind so teuer geworden, dass ihre Reform unausweichlich ist. Welche Rückwirkungen wird das auf die Leistungsfähigkeit der Marktwirtschaft haben? Welche Auswirkungen wird das auf gesellschaftliche und demo-

## BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg
- MPI für demografische Forschung, Rostock
- MPI zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Bonn
- MPI zur Erforschung von Wirtschaftssystemen, Jena
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht, München
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln

grafische Entwicklungen wie etwa die Geburtenentwicklung und die Familie haben, welche ihrerseits wiederum Märkte beeinflussen?

Ebenso notwendig wie die Erforschung der Leistungen des Marktes sind seine technischen, ethischen und politischen Grenzen. Schon Adam Smith kannte die Bedeutung einer öffentlichen, vom Staat zu erstellenden Infrastruktur – zu seiner Zeit: Brücken und Kanäle – für die Funktionsfähigkeit einer privaten Marktwirtschaft. Private Güter setzen öffentliche Güter voraus, die vom Markt nicht erzeugt werden können, und sie müssen vor negativen Effekten freier Märkte geschützt werden. Allerdings sind die Grenzen fließend und ändern sich als Folge technischer und institutioneller Innovationen. Nicht immer braucht man für die Bereitstellung von Gemeinschaftsgütern den Staat. Neue Regulierungsmethoden machen es möglich, bislang vom Staat erstellte Leistungen von Privaten im Wettbewerb erstellen zu lassen. Und Verbände können öffentliche Güter manchmal effizienter erstellen als staatliche Bürokratien.

#### Märkte: effizient und gerecht?

Ähnlich dynamisch und umstritten sind die Grenzen des Marktes in ethischer und politischer Hinsicht. Ein Beispiel ist der Konflikt zwischen dem Recht auf intellektuelles Eigentum und dem Anspruch armer Länder auf Versorgung mit unentbehrlichen Medikamenten. Ein anderes sind die Spannungen zwischen der Notwendigkeit eines patentrechtlichen Schutzes von Innovationen und dem öffentlichen Interesse an freiem Austausch wissenschaftlicher Information und offener Diskussion der Bürger

über Richtung und Folgen des wissenschaftlichen Fortschritts. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Verteilung von gesellschaftlich notwendigen Aufgaben im Spannungsfeld zwischen Staat, Markt und Familie. Zu denken ist hier nicht nur an Pflege und Betreuung, sondern auch an Erziehung und Ausbildung. Schließlich werden auch Märkte, wie viele andere soziale Einrichtungen, immer wieder daraufhin befragt, ob sie nicht nur effizient, sondern auch gerecht sind. Wie viel Ungewissheit und Risiko kann und darf eine marktwirtschaftlich organisierte Gesellschaft ihren Mitgliedern als Preis für die Leistungen von Märkten zumuten? Wenn die Welt vorhersehbar und sicher ist, treten die Vorzüge des Marktes am deutlichsten hervor. Je chaotischer die Umwelt ist, desto eher scheint es der planenden Hand des Staates oder moralischen Anstrengung aller zu bedürfen. Wie viel Ungleichheit als Ergebnis unterschiedlicher Marktleistungen und Marktchancen ist für eine Gesellschaft erträglich? Was müssen, dürfen und können Staaten und andere Akteure tun, damit die Chancen der Bürger, erfolgreich am Markt teilzunehmen, nicht allzu ungleich verteilt sind?



Institutionen sind für Menschen gemacht. Ja mehr noch: Institutionen sind nur sinnvoll, weil sie auf menschliches Verhalten einwirken. Einen Sturm kann niemand verhindern. Man kann höchstens Menschen dazu bringen, ihre Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren, und dadurch der Erwärmung des Planeten entgegenwirken. Institutionendesign beginnt deshalb mit der Rekonstruktion des lösungsbedürftigen Problems als Verhaltensänderung. Dann muss man prognostizieren, wie die erwogene institutionelle Intervention Verhalten ändern wird. Werden die Adressaten die Änderung überhaupt wahrnehmen? Welche Anpassungsreaktionen sind zu erwarten? Wie weit werden diese Reaktionen streuen? Kurz: Institutionendesign braucht ein psychologisches Fundament.

## INSTITUTIONEN FÜR DEN *HOMO SAPIENS*

### Institutionen als Elemente der Kultur

Institutionen sind die Spielregeln des Zusammenlebens. Ihr Reichtum ist groß: Das Recht, Lenkungssteuern, technische Standards, soziale Normen, die Sprache – all das und noch viel mehr zählt zu den Institutionen. Manche Institutionen sind über lange Zeit gewachsen und werden als Elemente der Kultur tradiert. Doch Institutionen können auch planhaft geschaffen oder geändert werden. Wissenschaft muss deshalb Institutionen nicht nur erklären. Sie muss auch bessere Institutionen entwerfen und zu diesem Zweck die Wirkung künftiger Institutionen prognostizieren.

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich viele Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen für diese Aufgaben auf das Rationalmodell verlassen, das vor allem in der Ökonomie gepflegt wird. Sie haben Institutionen als Restriktionen gedeutet. Eigentlich will das Individuum etwas anderes. Die Institution hindert es aber daran, seinen Willen ohne weiteres durchzusetzen. Das ist offensichtlich eine gehaltvolle Interpretation. Es gibt genug Egoisten, die in einer Gruppe rationaler Akteure eine Sogwirkung haben. Wenn die Begegnung mit einem Egoisten nicht vermieden werden kann, ist es sinnvoll, sich selbst vorsorglich lieber auch egoistisch zu verhalten.

Diese rationaltheoretischen Modelle arbeiten also mit einer Verhaltensannahme. Im Jargon spricht man vom *homo oeconomicus*. Er denkt nur an sich, und er blickt nur nach vorn. Das klingt klug. Doch bei näherem Zusehen ist der *homo oeconomicus* ein armseliges Wesen. Er stolpert von einem Dilemma in das nächste. Vor lauter Ausrechnen sei-

ner Gegner verheddert er sich in aberwitzig komplizierten Kalkülen. All das kommt natürlich vor. Wer verstehen will, was Unternehmen im Wettbewerb bewegt oder die Staaten im Kalten Krieg, der wird von der Rationaltheorie ziemlich gut bedient. Deshalb verspricht es Erfolg, die umhегenden Institutionen auf diese Erwartung hin auszurichten. Aber oft kommt man mit anderen Verhaltensannahmen weiter. Institutionen für den *homo sapiens* sehen anders aus als Institutionen für den *homo oeconomicus*.

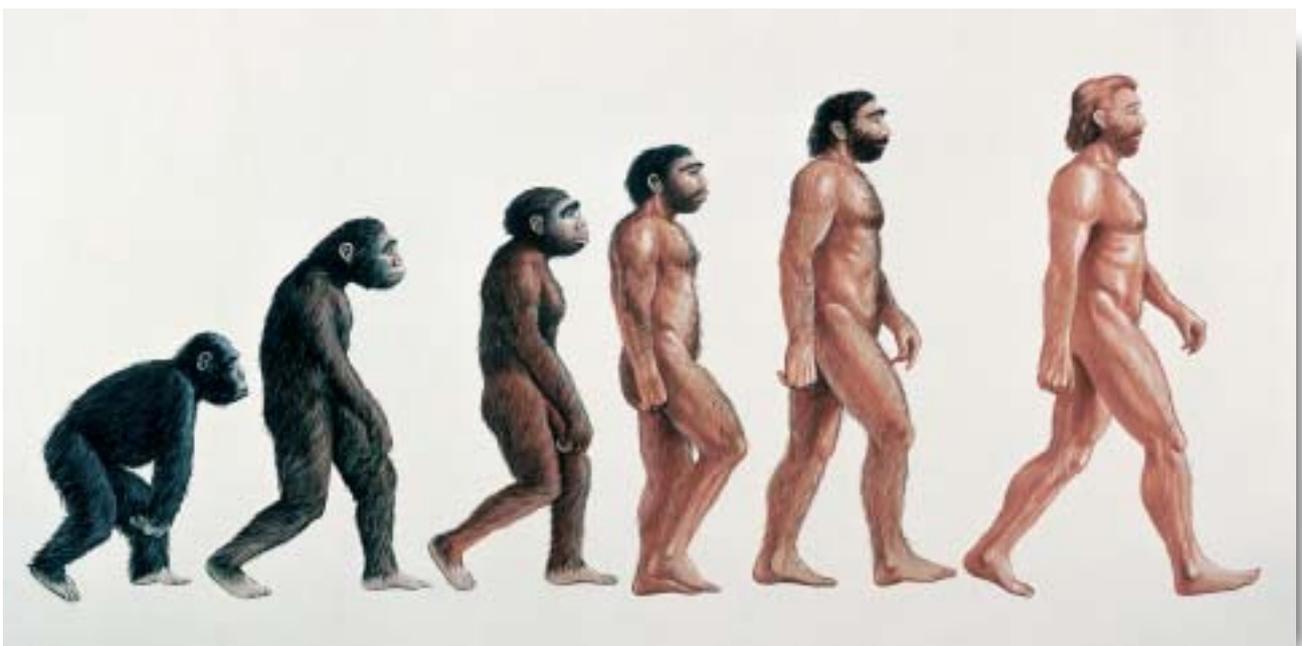
Das erkenntnistheoretische Problem verschwindet mit dieser wissenschaftlichen Entscheidung natürlich nicht. Einfach realistischer zu werden, ist kein gangbarer Weg. Wissenschaftliche Erkenntnis ist nur um den Preis partieller Abdunklung möglich. Man kann nur ein Modell durch ein anderes ersetzen, nicht auf Modelle verzichten. Aber auf zwei Arten kann man das Rationalmodell in Perspektive rücken und zugleich wissenschaftlichen Standards genügen. Die erste Lösung setzt an der Definition der Ausgangssituation an. Das Rationalmodell ist kontextfrei gedacht. Es ist ahistorisch. Die modellierten Individuen treffen in einem Naturzustand aufeinander. Sie wissen nichts voneinander. Andererseits ist die Welt des Rationalmodells höchst aufgeräumt. Jeder weiß, dass alle anderen nur ihrem Interesse folgen. Der Einzelne kann die anderen deshalb ausrechnen, wenn er nur an genug Information herankommt.

### Dem Lernen eine Richtung geben

Man kann die *conditio humana* auch ganz anders deuten. Jeder Mensch ist in eine übervolle Welt gestellt. Die Natur, vor allem aber seine Mitmenschen, konfrontieren ihn

ständig mit Überraschungen. Erfolg hat nur, wer die allgegenwärtige Unsicherheit produktiv nutzt. Auch in dieser Welt gibt es natürlich planende Egoisten. Aber es gibt auch Rache und Neid, Dummheit und Starrsinn und gut gemeinte, aber schädliche Reaktionen. Die Institutionen müssen also auf viel mehr vorbereitet sein. Andererseits wäre es verschwenderisch, mit teuren Institutionen unwahrscheinlichen Missbräuchen vorzubeugen. Und wenn

man einmal den Blick für den Kontext der Ausgangssituation öffnet, begegnen einem die Institutionen schon viel früher. Sie sind nicht mehr bloß Instrumente, um einen unwürdigen Naturzustand zu beenden. Vielmehr haben Institutionen auf vielfache Weise Einfluss auf die Situation, in der sich Menschen bewähren müssen. Das kann nur gelingen, wenn die Menschen bereits ihre Verhaltensprogramme auf die Allgegenwart von Institutionen aus-



© Corbis

richten. Schlagwortartig müssen Institutionen aus diesem Blickwinkel nicht so sehr den entgegenstehenden Willen ihrer Adressaten überwinden. Mindestens so wichtig ist es, ihnen Orientierung zu vermitteln und ihrem Lernen Richtung zu geben.

Die zweite konzeptionelle Strategie setzt nicht am Verhalten an, sondern an Verhaltensdispositionen. Sie blickt den Menschen also gleichsam in den Kopf. Hier tut sich ein großer Reichtum auf. Planvolles, überlegtes Handeln kommt darin zwar vor. Aber es ist nicht die Regel. Viel häufiger beurteilen Menschen ihre Umgebung nach ganz einfachen Regeln. Wenn sich die Adressaten ganz anders verhalten, verfehlen Institutionen ihr Ziel, die Rationalverhalten unterstellen. Sie missdeuten schon das regelungsbedürftige Problem. Und sie führen nicht zu der erwarteten Verhaltensänderung. Wie kann man aber Ordnung in die Fülle der Befunde aus Experimenten und Feldforschung bringen? Wie kann man vorab abschätzen, welche Disposition in welcher Situation Verhalten prägt?

#### Prognosen für die Wirkung von Institutionen

Aus diesen Überlegungen leitet sich ein ambitioniertes Ziel ab: das verhaltenswissenschaftlich informierte Design von Institutionen, was jedoch nicht auf einmal erreichbar ist. Man muss empirische Befunde über Verhalten zu Verhaltenstheorie verdichten, mit einer Institutionentheorie konfrontieren und daraus Prognosen für die Wirkung von Institutionen ableiten. Man muss mit anderen Worten die Brücke von Hirnforschung über Psychologie, Ökonomie, Institutionentheorie bis hin zur Juristerei schlagen. Dem widmet sich ein Verbund der Institute für Hirnforschung, Kognitions- und Neurowissenschaften, Bildungsforschung, Wissenschaftsgeschichte, Wirtschaftssysteme und Gemeinschaftsgüter.

Die notwendige Beschränkung kann sich aus dem regelungsbedürftigen Problem ergeben. Ein anschauliches Beispiel sind die Finanzmärkte – ein Forschungsgegenstand des Instituts für Gemeinschaftsgüter. Oder man kann ein Element der Verhaltenstheorie auf Institutionen beziehen. Das Thema einer Konferenz der Institute für Bildungsforschung und Gemeinschaftsgüter heißt: Was bedeutet es etwa für die Wirkung des Rechts, wenn sich die Rechtsunterworfenen fast immer von einfachen Heuristiken leiten lassen? Wie können Institutionen die stauenswerte Fähigkeit des menschlichen Gehirns zur unbewussten Verarbeitung von großen Datenmengen nutzen? – diese Frage steht im Mittelpunkt einer Konferenz

#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für Bildungsforschung, Berlin
- MPI zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Bonn
- MPI zur Erforschung von Wirtschaftssystemen, Jena
- MPI für Hirnforschung, Frankfurt/Main
- MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften, Arbeitsbereich Psychologie, Leipzig und München
- MPI für Wissenschaftsgeschichte, Berlin

der Institute für Hirnforschung und Gemeinschaftsgüter. Wie verhalten sich Menschen in Umgebungen, die von vornherein von einer Fülle von Institutionen geprägt sind – etwa in den Professionen des Arztes oder des Rechtsanwalts? Das ist Thema der Kooperation der Institute für Bildungsforschung, Wirtschaftssysteme und Gemeinschaftsgüter.



© alg-images

Wie sollen die natürlichen und menschlichen Ressourcen der Weltgesellschaft genutzt werden? Die Antwort auf diese Frage setzt nicht nur naturwissenschaftliche oder ökonomische Sachkenntnis voraus. Zentrale Voraussetzung für eine Steigerung der weltweiten Wohlfahrt, aber auch einer fairen Verteilung von Gütern, ist eine Rechtsordnung. Die ermöglicht es den Staaten und ihren Unternehmen und Bürgern überhaupt erst, durch Verfügungsrechte und Gütertausch eine produktive Verwendung zu organisieren. Dies zwingt zu Entscheidungen: Sollen der Staat oder die Bürger wirtschaftliche Aufgaben – etwa im Bereich der Daseinsvorsorge – wahrnehmen? Welche privaten Rechte hemmen oder fördern innovative Tätigkeit? Wem nützt ein Wettbewerbsrecht? Welchen günstigen oder schädlichen Einfluss nimmt der Steuerstaat auf das freie Spiel der Wirtschaftskräfte? Und wird die private Wirtschaft noch lange die staatlichen Sozialsysteme finanzieren? Erst die vollständige Wahrnehmung dieses vielstimmigen Konzerts rechtlicher Instrumente – auch in volkswirtschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Sicht – erlaubt Aussagen über die künftige Gestalt unserer Wirtschaftsordnung.

## EIGENTUMS- UND WETTBEWERBSORDNUNGEN ALS STRUKTURELLE VORAUSSETZUNG WIRTSCHAFTLICHER ENTWICKLUNG

### Kluge Ausgestaltung der weltweiten Eigentums- und Wettbewerbsordnung

Wir leben in einer Welt knapper Güter. Will man die Ressourcen unserer Umwelt, aber auch unserer menschlichen Leistungskraft und unseres Finanzkapitals zum allgemeinen Wohlstand einsetzen und sollen zugleich mit einer Förderung der Wirtschaftskraft auch deren Früchte gerecht verteilt werden, so sind die Rechtswissenschaft und benachbarte Sozialwissenschaften gefragt. Natürlich setzt der Wohlstand eines Landes, einer Region oder auch der globalen Weltgemeinschaft in erster Linie günstige natürliche und technische Rahmenbedingungen voraus. Und ebenso selbstverständlich erscheint es, dass der Versuch von Regierungen, Wohlstand und Gerechtigkeit von oben anzuordnen, erfolglos bleiben muss, wenn die Politik in ihrem Gestaltungswillen glaubt, die Naturgesetze der Ökonomie nicht beachten zu müssen. An diesem Irrtum sind die Planwirtschaften der sozialistischen Staaten gescheitert. Und doch: Nationale Parlamente und internationale Gremien können mit einer klugen und sachgerechten Ausgestaltung der weltweiten Eigentums- und Wettbewerbsordnung einen wesentlichen und fördernden Beitrag zu einer nachhaltigen und gerechten Entwicklung der nationalen Volkswirtschaften, aber auch der globalen Arbeits- und Kapitalmärkte leisten. Diesen Prozess wissenschaftlich zu begleiten, gehört zu den zentralen Zukunftsaufgaben der deutschen, europäischen und internationalen Forschung.

Von welcher tatsächlichen Grundlage muss diese Forschungsrichtung ausgehen? Wir können heute – nach dem weitgehenden Zerfall der isolierten Staatswirtschaften – davon sprechen, dass auf einem weltweiten Markt Sachgü-

ter, Kapital, Dienstleistungen und Arbeitskraft über nationale und geografische Grenzen hinaus angeboten werden. Wer diesen Markt ordnen und dabei sowohl Ziele der Wohlfahrtsförderung als auch der gerechten Verteilung – nicht zuletzt zwischen Kapital und Arbeit – verwirklichen will, muss wie ein Dirigent eine Vielzahl unterschiedlicher Instrumente aufeinander abstimmen.

Am Anfang steht die Grundfrage, wie die Sphären des Staates und der Bürgergesellschaft voneinander abzugrenzen sind. Wir sprechen hier von der Identifikation und Ausgestaltung privater Güter im Gegensatz zu „öffentlichen“ oder Gemeinschaftsgütern. Dabei erweist sich selbst der scheinbar unpolitische Zuschnitt von Rechten des Geistigen Eigentums als Sollbruchstelle unserer Privatrechtsordnung: Wieweit fördert, wieweit hemmt das Patent- oder Urheberrecht die Innovationskraft der modernen Wissensgesellschaft? Gleiches gilt für die Anziehungskraft von Märkten für das flüchtige, aber lebenswichtige Finanzkapital: Welche rechtliche Gestalt soll großen, auch multinationalen Unternehmensverbindungen zum Schutze der Aktionäre, der Kreditgeber, aber auch der Arbeitnehmer gewährt werden? Wie soll – nicht zuletzt gegenüber einem fehlgeleiteten Management – der Markt für die Unternehmenskontrolle organisiert werden. Wie soll an internationalen Börsen eine verlässliche und hilfreiche Information für private Anleger ausgestaltet werden? Es besteht kein Zweifel, dass diese Fragen heute nur noch im Wege grenzüberschreitender (auch den europäischen Rechtskreis übersteigender) Verständigung gelöst werden können, der eine international orientierte Rechtswissenschaft zur Seite stehen muss. Hat man schließlich den Bürgern funktions-

tüchtige Werkzeuge des Privatrechts an die Hand gegeben, so muss deren Schutz durch eine leistungsfähige Strafrechtsordnung gewährleistet werden, die für einen Kernbereich von Rechtsverletzungen einen internationalen Konsens strafwürdiger Verhaltensweisen erarbeitet. Der Kampf gegen die internationale Kriminalität darf nicht an staatlichen Regelungsgrenzen scheitern.

#### Faire und wohlfördernde Regeln finden

Wenn sich die Staaten – oder besser noch: die internationale Gemeinschaft – darauf verständigt haben, mit welchen rechtlichen „Werkzeugen“ der Bürger als Verbraucher oder als Unternehmer Zugriff auf natürliche und menschliche Ressourcen nehmen darf, ist die Arbeit noch nicht getan. Vielmehr müssen in einem zweiten Schritt faire und wohlfördernde Regeln für den nationalen und internationalen Güteraustausch gefunden werden. Dies erfordert zunächst eine schlüssige und rechtssichere Vertragsrechtsordnung, die jedoch – gerade mit Bezug auf das Geistige Eigentum – selbst auf nationaler Ebene oft nicht besteht und für welche die grenzüberschreitende Koordinierung noch in den Anfängen steckt. Die Probleme der internationalen Produktpiraterie, aber auch die territorial unbegrenzte Verfügbarkeit digitaler Waren sind nur zwei schlagkräftige Beispiele dafür, welche aktuellen wirtschaftlichen und politischen Implikationen die Gestaltung des Rechtsverkehrs aufweist. Doch auch ein stimmiges Vertragsrecht alleine würde den Ansprüchen der Unternehmen und Verbraucher nicht gerecht. Vielmehr muss tatsächlichen Ungleichheiten und Abhängigkeiten sozialer oder wirtschaftlicher Art mit einem leistungsfähigen Kartellrecht begegnet werden.

Reuters/Luis Caldamaz



Demonstranten protestieren gegen die Konferenz der WTO in Cancun.

Ein Blick auf die wirtschaftspolitischen Realitäten der nationalen und internationalen Gesetzgebung zeigt unmittelbar, dass jeder Versuch, einen internationalen Konsens für eine weltweit (oder auch nur europaweit) funktionsfähige Eigentums- und Wettbewerbsordnung herzustellen, durch das Gegenmodell des Systemwettbewerbs der Staaten grundlegend in Zweifel gezogen wird. Kann sich – so lautet die Frage – staatliche Gesetzgebung oder wissenschaftliche Forschung überhaupt anmaßen, international überzeugende und dauerhaft verbindliche Maßstäbe für den Güteraustausch etwa zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern zu formulieren? Erweist es sich als günstiger, im offenen Wettstreit der Parlamente die beste Lösung zu fin-

den? Oder sollte man noch radikaler vorgehen und die Regulierung des Wirtschaftslebens weitgehend den Betroffenen selbst überlassen, die durch besondere Sachkunde, aber auch ein besonderes Sachinteresse zur Qualität der Normgebung beitragen können?



Landwirte und Globalisierungsgegner demonstrieren in Bangkok gegen die geplante WTO-Konferenz in Cancun 2003.

In der Lebenswirklichkeit treffen wir zunehmend auf eine solche Privatisierung der Gesetzgebung. Am Beispiel des Corporate-Governance-Kodex für das Management großer Aktiengesellschaften zeigt sich täglich das komplizierte Wechselspiel privater Verhaltensregeln und staatlichen Zwangs. Exemplarisch für die internationale Regulierung von Handelsströmen ist schließlich die Tätigkeit der Welt Handelsorganisation, die – von vielen unbeachtet – heute ebenso ein Forum bezüglich der Konflikte um die Agrarpolitik großer Industriestaaten, die steuerliche Förderung von Exporten oder den Zugang zu Hochtechnologiewaren bildet. Dabei darf nicht unbeachtet bleiben, dass eine präzise Analyse der Interessengegensätze zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern noch aussteht, wobei innerhalb der beteiligten Staaten wiederum die Interessenlage der Regierung, der Wirtschaft oder der Allgemeinbevölkerung differenzierend in den Blick genommen werden muss. Beispielhaft sei nur die Frage genannt, ob die Einführung weltweiter Standards für ein Kartellrecht aus der Sicht eines Entwicklungslandes nationale Wirtschaftskräfte produktiv freisetzt oder lebensfähige heimische Industriezweige unter dem ungebremsten Druck multinationaler Anbieter zusammenbrechen müssen.

#### Das freie Spiel der Marktkräfte hinterfragen

Wer das Funktionieren einer Eigentums- und Wettbewerbsordnung in aller Tiefe verstehen will, muss schließlich die vielfältigen Einwirkungen des Staates auf den privaten Gütertausch in den Blick nehmen. Indem der Staat im Wege der Besteuerung dem Bürger private Wirt-



#### BETEILIGTE INSTITUTE

- MPI für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
- MPI für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg
- MPI für ausländisches und internationales Sozialrecht, München
- MPI für ausländisches und internationales Strafrecht, Freiburg
- MPI zur Erforschung von Wirtschaftssystemen, Jena
- MPI für ethnologische Forschung, Halle/Saale
- MPI für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht, München
- MPI für Gesellschaftsforschung, Köln

schaftskraft entzieht, stärkt er die Nachfragekraft der öffentlichen Hand. Die enorme Macht staatlicher Einrichtungen als Nachfrager kommt aus der Sicht des internationalen Wettbewerbs am deutlichsten in der Vergabe milliardenschwerer öffentlicher Aufträge etwa im Infrastruktur- oder Rüstungsbereich zum Ausdruck, die inzwischen Gegenstand einer komplexen europäischen Regelung geworden ist. Der Zugriff des Steuerstaates – man denke nur an die umweltorientierten Mineralöl- und Stromsteuern – wirkt aber auch unmittelbar auf das Verhalten und die Wettbewerbsverhältnisse von Unternehmen und Verbrauchern. Daher müssen sich Steuergesetzgeber weltweit nach ihrem Verhältnis zum freien Spiel der Marktkräfte befragen lassen. Als Prüfstein staatlicher Handlungsfähigkeit zeigt sich vor allem das Phänomen des internationalen Steuerwettbewerbs, der mit zunehmender Mobilität der Produktionsfaktoren die Kontrolle staatlicher Gesetzgebung über die Wirtschaftskraft einer Gesellschaft untergräbt.

Am Beispiel der Osterweiterung der Europäischen Union ist deutlich geworden, dass dies eines der zentralen Probleme der internationalen Wirtschaftspolitik darstellt. Schließlich befähigt die Verlagerung von Ressourcen auf die öffentliche Hand eine breit angelegte und global praktizierte Subventionspolitik, deren Grenzen im Rahmen des nationalen Verfassungsrechts, des europäischen Gemeinschaftsrechts, aber auch weltweiter Einrichtungen (WTO) wegen ihrer massiven Auswirkungen auf den internationalen Wettbewerb in den Blick genommen werden müssen.

Dass schließlich eben diese Verlagerung von Kaufkraft auf die öffentliche Hand wesentlich zur Finanzierung der nationalen Sozialsysteme beiträgt und deren Tradition als selbstverständlich akzeptierte staatliche Monopole unter dem Druck des internationalen Wettbewerbs ebenfalls grundlegend in Frage gestellt wird, ist allgemein bekannt.

In den Instituten der Max-Planck-Gesellschaft ist die Aufgabe, die nationale und internationale Entwicklung der Eigentums- und Wettbewerbsordnung wissenschaftlich zu begleiten und grundlegende Modelle für eine koordinierte Gesetzgebung zu erarbeiten, präsent. Nicht zuletzt in institutsübergreifenden Projekten – beispielsweise zur Zukunft der Steuer- und Sozialsysteme im europäischen Wettbewerb oder zu den rechtlichen Rahmenbedingungen der Hochtechnologie – sollen Zukunftsperspektiven staatlicher Gesetzgebung berücksichtigt werden.

- A** Adam Smith 116 f.  
 Altern, biologisches 92  
 Altern, gesellschaftliches 94  
 Altersforschung 94  
 Alterserscheinungen, degenerative 93  
 Altersveränderungen 107  
 Arbeitsteilung, internationale 111  
 Archaeen 38  
 Astrophysik 24, 29, 68  
 Autonomie 18, 63, 65
- B** Bakterien 37 f.  
 Berliner Erklärung 20  
 Berufungsverfahren 14  
 Bibliotheken, chemische 44  
 Biodiversität 40, 42  
 Bioinformatik 74, 78, 90  
 Biologie, theoretische und mathematische 74  
 Biomimetische Materialien 51  
 Biotechnik-Debatte 63  
 Blastozysten 88  
 Brennstoffzelle 36, 54, 73
- C** Computational Biology 74  
 Computermodellierung 67 f.  
 Computersimulation 48  
 Computersysteme, intelligente 60  
 Corporate-Governance-Kodex 124
- D** Depression 90  
 Diskriminierung 110  
 DNA-Analyse 41  
 Dunkle Energie 24, 25, 28  
 Dunkle Materie 24, 26, 27
- E** Eingliederung, kulturelle 109  
 Einstein-Jahr 13  
 Elementarteilchen 26 f., 57  
 Energieforschung 20  
 Energieversorgung 33 f., 36  
 Erdsystemforschung 32  
 Erkrankungen, neurologische 99  
 Evolution 40, 46, 49, 71, 89  
 Expressionsmuster 70
- F** fMRT 100 f.  
 Fortpflanzung, sexuelle 27  
 Fotosynthese 35, 38, 43  
 Funktionsmaterialien 53, 55, 68  
 Fusion 57
- G** Galaxien 25  
 Gehirn 48  
 Gemeinschaftsgüter 111, 116, 118, 122  
 Genetik, chemische 44, 84  
 Genexpressionsanalyse 44  
 Genomanalyse 41, 85  
 Genomik, chemische 83, 90  
 Gesichter 103  
 Globaler Wandel 31  
 Gravitationswellen 25, 57  
 Grundlagenforschung 7 f., 14, 18, 38, 64, 89  
 Grüne Gentechnik 20  
 Gütertausch 123
- H** Handlungskoordination 107  
 Harnack-Prinzip 17  
 Heterogenität, soziale 110  
 Hirnareale 98  
*homo oeconomicus* 119  
 Hybrid- und Multiskalenverfahren 68
- I** Immungene 47  
 Infektionsbiologie 89  
 Infektionskrankheiten 37, 47, 89  
 Informationstechnologie 61  
 Institutionen 63  
 Institutionentheorie 121  
 Internationalisierung 111, 112  
 Internationalität 11
- K** Kartellrecht 117, 124  
 Katalyse 34, 54, 55  
 Katalyseprozesse 68  
 Kernfusion 34  
 Kernfusionsplasma 28  
 Kernspintomografie 81, 98, 101  
 Kernspintomografie, funktionelle 98, 100 f., 103  
 Klimagas 38  
 kombinatorische Chemie 84  
 Komplementarität 10  
 Konfliktrisiken 114  
 Kontrollverlust, nationalstaatlicher 113  
 Krankheitserreger 42, 47, 89  
 Krankheitsprävention 89  
 Kriminalität 113, 123
- L** Laser 56, 80  
 Lern- und Entwicklungsprozesse 105  
 Lichtmikroskopie 57, 80  
 Lichtquellen 56 f.
- M** Macht, wirtschaftliche 116  
 Marktwirtschaften, moderne 116

- Materialien, nanostrukturierte 36  
 Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns 14, 94  
 Max-Planck-Institut für Softwaresysteme 14, 59  
 Membranproteine 79  
 Menschenaffen 48 f.  
 Methan 36, 38  
 Migration 109  
 Modellierung, mathematische 71, 73  
 Molekulargenetik 44  
 Molekülbibliotheken 85  
 Molekülsonden 83  
 MPG Forschungsperspektiven 2005+ 15
- N** Nachwuchsförderung 11  
 Nanoelektronik 54  
 Nanooptik 57  
 Nanostruktur 36, 52 f.  
 Nanotechnologie 52, 90  
 Nationalstaat 111  
 Netzwerk, regulatorisches 43, 45  
 Netzwerke, neurale 101  
 Netzwerkknoten 71  
 Neurone 98, 100  
 Neurowissenschaft, systemische 100
- O** Open Access-Initiative 20  
 optische Technologien 56
- P** Peer-Review-System 17  
 Perovskite 55  
 Personalität 106  
 Perspektivenplanung 14, 15  
 Pflanzengenome 43  
 Pflanzenmerkmale 43  
 Pflanzenzüchtung, rationale 45  
 Planungssicherheit 18  
 Plasmaphysik 28  
 Proteomanalyse 85
- Q** Qualitätssicherung 16  
 Quantencomputer 56  
 Quantentheorie 24
- R** Rastersondentechniken 54  
 Rationalverhalten 120  
 Regulationsnetzwerke 71  
 Relativitätstheorie 24
- S** Schaltkreise, neuronale 97  
 Schizophrenie 49  
 Schwarze Löcher 24, 29  
 Selbst-Anordnung, molekulare 52
- Selektion 46, 49  
 Seneszenz 92  
 Sicherheitsdebatte 113  
 Sichtbarkeit, internationale 10  
 smart agent-Technologie 102  
 Softwaresysteme 59  
 Sozialstrukturen 49  
 Spitzenforschung 9  
 Spitzenuniversitäten 19  
 Sprachcorpora 62  
 Spracherwerb 49, 99  
 Sprachstrukturen 104  
 Stammzellen, adulte 86  
 Stammzellen, embryonale 20, 86, 88  
 Stammzellentherapie 63  
 Steuerwettbewerb, internationaler 125  
 Strukturbestimmung 77  
 Strukturbiologie 77, 79, 81  
 Supersymmetrietheorien 26  
 Systembiologie 68, 71, 73, 79  
 Systeme, komplexe 73  
 Systemtechnik 73
- T** Technologietransfer 13  
 Teilchenphysik 27  
 Terrorismus 113  
 Tierschutz 20
- U** Umweltprozesse 38  
 Universum 24 ff., 57  
 Urheberrecht 122  
 Urknall 26
- V** Vergleichsstudien, internationale 62  
 Verhaltensdispositionen 120  
 Vernetzung, hochgradige 72  
 Versuchsfelder 42  
 Vertragsrechtsordnung 123  
 Visual Computing 60
- W** Wasserstoff 35 f., 38  
 Weltgemeinschaft 122  
 Weltraummissionen 25  
 Werkstoffe, technische 51  
 Wertkonflikte 110  
 Wissenschaften, historische 61  
 Wissenschaftspolitik 63  
 Wissenschaftsgesellschaft 65
- Z** Zellen, pluripotente 86

# STANDORTE DER FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtung

Stand: Januar 2005



## KENNZAHLEN ZUR MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT 2004

(\* lt. Haushaltsplan 2004)

Gesamthaushalt\* 1.325,2 Mio. € davon Projektförderung\* 173,6 Mio. €

Institute und Forschungseinrichtungen: 78 davon im Inland 75, im Ausland 3

Beschäftigte: 12.261 · Direktoren: 272 · Wissenschaftler: 4.206 · Wiss. Nachwuchs und Gastwissenschaftler: 9.598

Weiterführende Informationen finden Sie unter: [www.mpg.de](http://www.mpg.de)