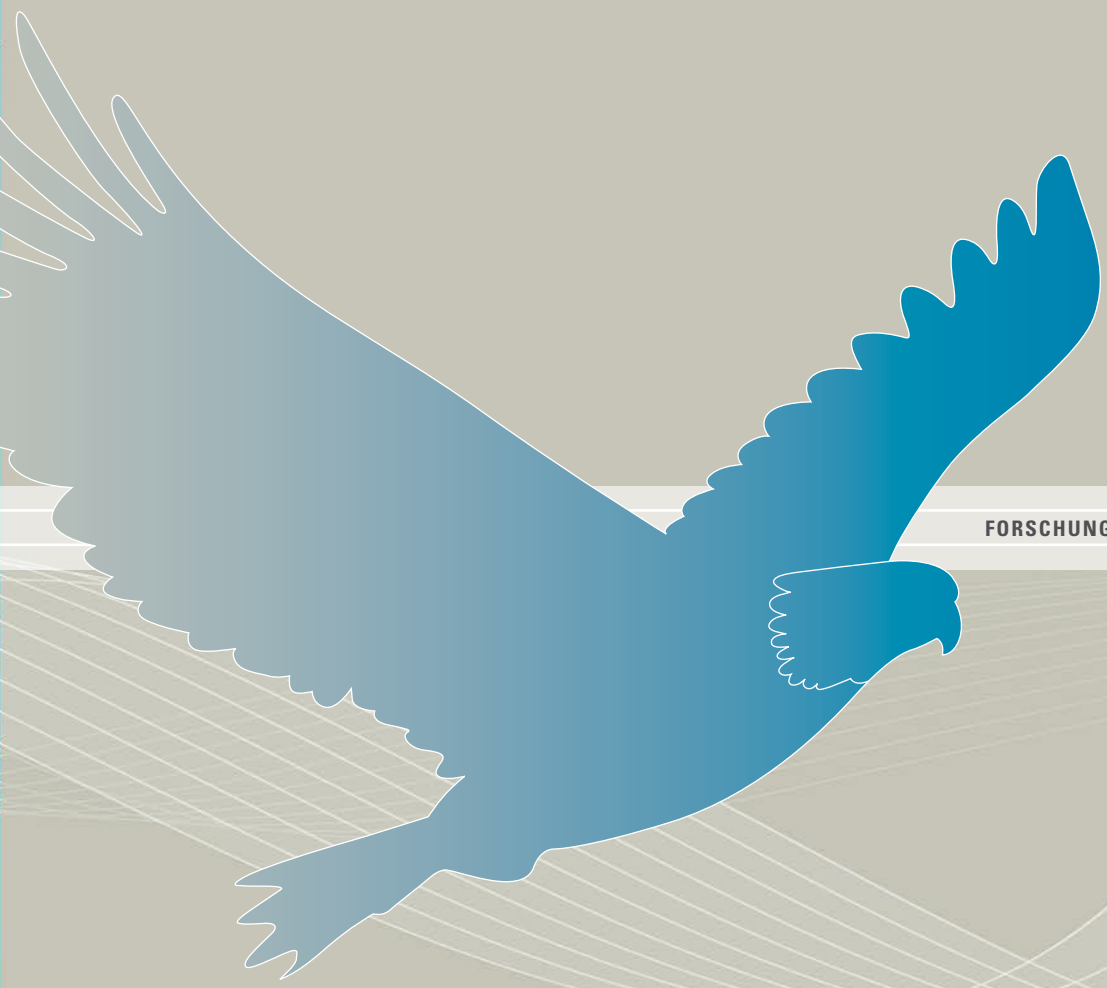
05
11° 00′
55
10° 50′
19h 32m 20s
10s
00s
31m 50s
40s
30s



FORSCHUNGSAUSBLICK | RESEARCH OUTLOOK

Forschungsausblick

Jens Beckert über die Finanzkrise als Vertrauenskrise
Günther Hasinger über Fortschritte in der Fusionsforschung
Detlef Weigel über die Anpassung von Pflanzen an Umweltveränderungen

Research Outlook

Jens Beckert about the Financial Crisis as a Crisis of Trust
Günther Hasinger about Progress in Nuclear Fusion Research
Detlef Weigel about the Adaptation of Plants to Changes in the Environment

PROF. DR. JENS BECKERT
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR GESELLSCHAFTSFORSCHUNG, KÖLN

Die Finanzkrise ist auch eine Vertrauenskrise

FORSCHUNGSAUSBLICK | RESEARCH OUTLOOK

Am 17. September 2007 bildeten sich vor den Filialen des britischen Bankhauses Northern Rock lange Schlangen. Anleger, die ihre Sparguthaben bei der Bank deponiert hatten, wollten ihr Geld abheben. Was sie zum Schlange stehen brachte, waren jedoch nicht geplante Geschäfte, die mit Bargeld beglichen werden sollten. Vielmehr fürchteten sie den Zusammenbruch der überschuldeten Bank und den Verlust ihres dort deponierten Geldes.

Schlangen vor Banken hätte es beinahe auch ein Jahr später in Deutschland gegeben. Nach dem Zusammenbruch der amerikanischen Investmentbank Lehman Brothers am 15. September 2008 fürchteten auch deutsche Anleger um die Sicherheit ihrer Guthaben. Die Bundesbank registrierte bereits eine deutliche Zunahme der Bargeldabhebung an Geldautomaten. Dass diese Entwicklung gestoppt wurde, bevor sich Schlangen vor den Bankschaltern bildeten, hatte eine klar benennbare Ursache: eine Erklärung der Bundeskanzlerin und des Finanzministers am 5. Oktober 2008, dass der Staat für sämtliche Spareinlagen der Bürger bei den Banken einstehen würde. Diese Garantie beruhigte die Bürger so weit, dass sie ihr Geld bei ihrer Bank beließen, anstatt es zu Hause oder in einem Safe zu deponieren. Ob der Staat die Garantie mit einem Volumen von 568 Mrd. Euro tatsächlich hätte einlösen können, ist mehr als fraglich. Die Summe liegt doppelt so hoch wie der Bundeshaushalt.

DIE EINLAGE VON GELD BEI DER BANK SETZT DAS VERTRAUEN VORAUS, DASS DIE BANK DIESES GELD JEDERZEIT WIRD ZURÜCKZAHLEN KÖNNEN.

Der im Herbst 2008 gerade noch verhinderte Bank Run wirft ein Licht auf einen unverzichtbaren, zumeist jedoch unbeachtet bleibenden Koordinationsmechanismus wirtschaftlichen Handelns: Vertrauen. Die Einlage von Geld bei der Bank – was nichts anderes ist als ein Kredit an die Bank – setzt das Vertrauen voraus, dass die Bank dieses Geld jederzeit wird zurückzahlen können. Kommen Zweifel an der Zahlungsfähigkeit oder der Zahlungswilligkeit der Bank auf, wie im Herbst 2008, wird dieses Vertrauen zerstört. Die Kunden verlangen ihr Geld zurück. Bei einem Bank Run ist dies noch mit dem Problem sich selbst verstärkender Effekte verbunden. Der Verlust des Vertrauens produziert möglicherweise erst die Liquiditätsprobleme, vor denen die Schlange stehenden Kunden ihre Einlagen in Sicherheit bringen wollen. Denn keine Bank kann die Einlagen sämtlicher Kunden gleichzeitig zurückzahlen. Deshalb genügen bei Banken bereits Gerüchte um Zahlungsschwierigkeiten für die Auslösung eines Vertrauensverlustes, der dann zum Zusammenbruch der Bank führt.

Vertrauen ist auf den Finanzmärkten jedoch nicht nur ein zentraler Handlungsmechanismus, wenn es um die Sicherheit von Spareinlagen geht. In der Finanzkrise konnte man beobachten, was passiert, wenn Banken sich untereinander nicht mehr vertrauen. Im sogenannten Interbankenhandel leihen sich Geschäftsbanken regelmäßig Milliardenbeträge für zumeist sehr kurze Zeiträume, mit denen Liquidität gesichert wird. Die Finanzkrise brachte diesen Interbankenhandel vollständig zum Erliegen. Nach der Erfahrung der Insolvenz von Lehman Brothers konnte sich keine Bank mehr sicher sein, ob die Bank, an die über Nacht mehrere hundert Millionen Euro verliehen würden, diese am nächsten Tag noch zurückzahlen können würde. Was die Banken an Liquidität hatten, gaben sie nicht mehr ab. Das Vertrauen war zerstört. Hätte man die Banken allein dem Markt überlassen, wäre das Finanzsystem

zusammengebrochen. Dieses Marktversagen wurde ebenfalls durch staatliches Eingreifen verhindert. So wie der Staat den privaten Anlegern ihre Einlagen garantierte, so trat er den Geschäftsbanken jetzt als Kreditgeber gegenüber. Hunderte Milliarden Euro wurden den Geschäftsbanken von den Zentralbanken zur Verfügung gestellt. Das dem Markt entzogene Vertrauen wurde wiederhergestellt, indem der Staat seine Vertrauenswürdigkeit in die Waagschale warf. Dem Staat wurde das Vertrauen entgegengebracht, das die Banken verspielt hatten.

In der Wirtschaftssoziologie ist die Untersuchung von Vertrauen während der letzten Jahre zu einem wichtigen Forschungsgegenstand geworden. Dabei geht es sowohl um die Bedeutung von Vertrauen für die Effizienz der Wirtschaft als auch um das Verständnis der Grundlagen von Vertrauen. Die gegenwärtige Finanz- und Wirtschaftskrise liefert für diese Forschung vielfältiges Anschauungsmaterial. Denn Vertrauen gehört zu jenen Phänomenen des sozialen Lebens, die weitgehend unbemerkt bleiben, solange sie vorhanden sind. Wenn Vertrauen thematisiert wird, dann ist es oft schon zerstört.

Vertrauen lässt sich als eine bestimmte Erwartungshaltung definieren. Nämlich als die Erwartung einer Person – des Vertrauensgebers –, dass der Handlungspartner, der Vertrauensnehmer, eine Vorleistung nicht zu seinem Vorteil ausnutzen wird. Vertrauen setzt insofern immer die Handlungsfreiheit des anderen voraus. Wo Zwang im Spiel ist, gibt es kein Vertrauen. Aufgrund der prinzipiellen Handlungsfreiheit des Vertrauensnehmers ist Vertrauen immer mit Unsicherheit verbunden. Kann ich mich auf den anderen verlassen, oder nicht? Kann die Bank meine Spareinlage tatsächlich zurückzahlen, oder behauptet sie dies nur, um an mein Geld zu kommen? Der Soziologe Georg Simmel hat Vertrauen treffend als einen mittleren Zustand zwischen Wissen und Nichtwissen bezeichnet. Zwar erwartet der Vertrauensgeber, dass sein Vertrauen in den Vertrauensnehmer nicht enttäuscht wird, doch völlig sicher sein kann er sich nicht. Vertrauen entzieht sich somit der Logik der Kalkulation, auf der ökonomische Theorien rationaler Wahl aufbauen. Das Risiko der Handlung lässt sich nicht kalkulieren.

Es lassen sich nur Einschätzungen des Risikos abgeben, die auf der Interpretation der zur Verfügung stehenden Informationen beruhen. Wer sich dann zu der Handlung entschließt, blendet dieses Risiko faktisch aus. Erwartet wird, dass der andere sich als vertrauenswürdig erweist, obwohl auch das genaue Gegenteil der Fall sein kann. In gewisser Weise fingiert Vertrauen einen Zustand und reduziert damit die Komplexität der Handlungssituation. Vertrauen ist ein Beruhigungsmittel angesichts von Unsicherheit, das gemeinsames Handeln ermöglicht.

DAS DEM MARKT ENTZOGENE VERTRAUEN WURDE WIEDERHERGESTELLT, INDEM DER STAAT SEINE VERTRAUENSWÜRDIGKEIT IN DIE WAAGSCHALE WARF. DEM STAAT WURDE DAS VERTRAUEN ENTGEGENGEBRACHT, DAS DIE BANKEN VERSPIELT HATTEN.

Dies wird sofort offensichtlich, stellt man sich einen Akteur vor, der nicht vertraut. Dieser würde niemals sein Geld zu einer Bank bringen und würde wohl auch immer nur mit passendem Kleingeld bezahlen, aus Angst sein Wechselgeld nicht zu bekommen. Streng genommen würde eine solche Person erst gar kein Geld annehmen. Denn Geld ist nichts anderes als ein Stück wertloses Papier, das mit dem Versprechen versehen ist, es gegen nützliche Waren eintauschen zu können. Doch wer weiß? „In God we trust“ heißt es treffend auf amerikanischen Banknoten. Menschen, die keinerlei Vertrauen haben, sind pathologische Fälle. Es gibt sie, wenngleich nicht sehr häufig. Doch das Gedankenexperiment einer Welt ohne Vertrauen hilft zu verstehen, wie zentral Vertrauen für die Ermöglichung der Kooperation zwischen Akteuren und damit auch für eine arbeitsteilige Wirtschaft ist.

Vertrauen eröffnet Kooperationsräume. Hierin liegt die zentrale Bedeutung dieses Handlungsmechanismus für die Wirtschaft, aber auch für sämtliche anderen Bereiche sozialen Handelns. Dabei verlangt uns die moderne Gesellschaft, entgegen der häufig anzutreffenden Einschätzung eines allgemeinen Vertrauensverlustes, immer mehr Vertrauen ab. Eine zentrale Leistung moderner Gesellschaften besteht darin, Vertrauen in viel höherem Maß generieren zu können als traditionale Gesellschaften. Vertrauen in traditionalen Gesellschaften konzentriert sich auf den sozialen Nahbereich – die Familie, die Nachbarschaft und einige eng umgrenzte Institutionen. In modernen Gesellschaften multiplizieren sich die Begegnungen mit völlig fremden Personen und einer Vielzahl sozialer Institutionen und Expertensystemen, denen vertraut wird. Erst daraus entstehen die Handlungsräume der Kooperation, die Kreativität, Innovation und eine umfassende Erschließung der Welt im Handeln ermöglichen – und die zugleich Risiken mitentstehen lassen, die traditionalen Gesellschaften völlig

unbekannt sind. Wie aber gelingt diese Ausweitung von Vertrauen in modernen Gesellschaften und ihren Ökonomien? Vertraut wird nicht blind, sondern aufbauend auf sozialen Grundlagen, die es Akteuren ermöglichen, eine Situation hinreichend einschätzen zu können, um begründete Zuversicht hinsichtlich der Handlungsabsichten des Vertrauensnehmers zu erlangen. Vertrauen ist, um noch einmal auf Georg Simmel zu verweisen, ein Zustand zwischen Wissen und Nichtwissen und nicht einfach ein unbegründetes Hoffen.

Eine soziale Grundlage von Vertrauen sind Institutionen. Ein Beispiel hierfür ist die Einlagensicherung der Banken, mit der Sparern zugesichert wird, im Falle des Zusammenbruchs der eigenen Bank aus einem von allen Banken gemeinsam gespeisten Fonds die Einlagen doch zurückzuerhalten. Das Risiko wird gepoolt und Vertrauen verlagert sich auf die Einschätzung der Zuverlässigkeit des Einlagensicherungsfonds. Die Anleger bei isländischen Banken wissen seit zwei Jahren, dass auf solche Garantien nicht unbedingt Verlass ist. Und die Garantie der Bundeskanzlerin im Herbst 2008 antizipierte, dass die Anleger den Einlagensicherungsfonds in Deutschland angesichts des Ausmaßes der Krise nicht vertrauen würden. Diese können bei Insolvenz einer einzelnen Bank den Schaden kompensieren, nicht jedoch bei Zusammenbruch des gesamten Bankensystems.

VERTRAUEN ERÖFFNET KOOPERATIONSRÄUME. HIERIN LIEGT DIE ZENTRALE BEDEUTUNG DIESES HANDLUNGSMECHANISMUS FÜR DIE WIRTSCHAFT, ABER AUCH FÜR SÄMTLICHE ANDEREN BEREICHE SOZIALEN HANDELNS.

Ein anderes Beispiel für die institutionelle Absicherung von Vertrauen in Wirtschaftsbeziehungen sind Herstellergarantien. Die meisten Käufer eines Gebrauchtwagens sind keine Autoexperten und können daher den Zustand des ihnen angebotenen Autos nicht wirklich beurteilen. Der Verkäufer ist zwar ein Experte, doch der hat kein Interesse, die Mängel des Autos preiszugeben. Schließlich will er den Wagen zu einem möglichst hohen Preis verkaufen. Natürlich weiß dies der Käufer. Naheliegend wäre also, dass sich alle Nichtexperten als Käufer von diesem Markt zurückziehen, weil sie den Angaben der Verkäufer nicht vertrauen. Der Markt würde aufgrund fehlenden Vertrauens der Käufer also gar nicht erst in Gang kommen. Eine Lösung für dieses Problem sind Gebrauchtwagengarantien, in denen der Verkäufer sich verpflichtet, für eine bestimmte Zeit nach dem Kauf noch für die Kosten der Beseitigung etwaiger Mängel aufzukommen. Der Käufer kann nun beruhigt kaufen, weil der Verkäufer kein Interesse mehr hat, den Käufer über den tatsächlichen Zustand des Wagens zu täuschen bzw., wenn er es doch tut, der Verkäufer die Kosten der Mängelbeseitigung tragen muss. Auch in diesem Beispiel wird Vertrauen verschoben: Der Käufer muss immer noch der Garantie selbst Vertrauen entgegenbringen. Nur wenn ein effektives Rechtssystem besteht, von dem der Käufer erwartet, seine etwaigen Ansprüche befriedigt zu bekommen, funktioniert die institutionelle Absicherung von Vertrauen im Markt.

Vertrauen in wirtschaftlichen Beziehungen wird aber nicht nur institutionell abgesichert. Eine weitere Grundlage ist die Reputation des Vertrauensnehmers. Potenzielle Kooperationspartner ziehen aus dem vergangenen Handeln des Vertrauensnehmers Rückschlüsse auf seine Vertrauenswürdigkeit in der Zukunft. Dafür muss das Handeln des Vertrauensnehmers von weiteren potenziellen Kooperationspartnern beobachtet werden können. Voraussetzung für diese Form der Absicherung von Vertrauen ist also ein hohes Maß an Markttransparenz. Ein besonders einschlägiges Beispiel für Vertrauensgenerierung durch Reputation ist das Online-Auktionshaus eBay. Hier werden die Verkäufer regelmäßig von den Käufern bewertet. Diese Bewertungen und die Anzahl der von dem Anbieter bereits getätigten Geschäfte sind für jeden Bieter sichtbar. Wer sich in der Vergangenheit als zuverlässig erwiesen hat, dem wird Vertrauen entgegengebracht. Wer auch zukünftig Geschäfte machen möchte, wird sich ehrlich verhalten, um negative Bewertungen zu vermeiden. Da das Vertrauensproblem bei anonymen Geschäften im Internet eine solch überragende Bedeutung hat, lässt sich sagen, dass die Glaubwürdigkeit des Bewertungssystems das zentrale Geschäftskapital von eBay ist. Nicht zufällig investiert eBay viel Geld in dieses System und seine Verbesserung.

Eine weitere Grundlage von Vertrauen sind soziale Netzwerke. Das können Familiennetzwerke ebenso sein wie Netzwerke innerhalb von Professionen oder ethnischen Gemeinschaften. Der zentrale Mechanismus zur Absicherung von Vertrauen in Netzwerken sind Sanktionen, durch die Mitglieder in dem Netzwerk im Fall des Vertrauensmissbrauchs von den Vorteilen der Mitgliedschaft ausgeschlossen werden. Ethnische Minderheiten werden in vielen Ländern bei der Kreditvergabe diskriminiert oder werden aufgrund fehlender Sicherheiten von der Kreditvergabe durch Banken ausgeschlossen. Eine Reaktion hierauf ist die Entstehung informeller Systeme der

Kreditvergabe innerhalb der ethnischen Gruppen. Kredite werden hier ohne Sicherheiten vergeben. Kreditnehmer und Kreditgeber sind jedoch in dem gleichen sozialen Netzwerk, was sowohl die Beobachtung des Kreditnehmers als auch dessen Sanktionierung im Fall des Zahlungsausfalls ermöglicht. Der Ausschluss aus dem Netzwerk bedeutet, die einzige Quelle von Kredit zu verlieren – ein hoher Preis.

Schließlich wird Vertrauen auch performativ hergestellt. Dieser Mechanismus ist von den anderen nicht getrennt, sondern geht mit ihnen einher. Mit performativer Herstellung von Vertrauen ist das Eindrucksmanagement des Vertrauensnehmers gemeint, durch das dieser Vertrauenswürdigkeit signalisiert und Vertrauensbereitschaft des Vertrauensgebers erzeugt. Das professionelle Auftreten des Personals einer Fluggesellschaft, einschließlich des zuversichtlichen Lächelns der Flugbegleiter, sind performative Akte der Selbstdarstellung, mit denen Vertrauenswürdigkeit signalisiert wird. Man stelle sich eine Bank vor, die in einem alten Schuppen untergebracht ist und deren Mitarbeiter in Freizeitkleidung hinter dem Schalter sitzen. Wer würde einer solchen Bank sein Geld anvertrauen? Über die Solvenz der Bank sagt die Kleidung der Mitarbeiter aber gar nichts aus. Wir interpretieren dieses Signal aber genau so, vor dem Hintergrund von Annahmen, wie eine seriöse Bank aufzutreten hat. Solche performativen Akte der Selbstdarstellung sind ein zentrales Moment der Vertrauensgenerierung. Eben weil sich die Vertrauenswürdigkeit des Vertrauensnehmers nicht sicher vorhersagen lässt, erhalten Signale eine solch zentrale Bedeutung.

Damit wird zugleich ein Übergang markiert. Weil Vertrauen die Kontingenz der Handlung des Vertrauensnehmers nur ausgrenzt, die Unsicherheit aber nicht tatsächlich beseitigt, entstehen Möglichkeiten des Vertrauensmissbrauchs. Die Paradoxie des Vertrauens besteht darin, dass dieses nicht nur Kooperationsräume schafft, sondern zugleich Möglichkeiten der Ausbeutung entstehen lässt. Auch hierfür bietet die derzeitige Finanz- und Wirtschaftskrise vielfältiges Anschauungsmaterial. Der Finanzinvestor Bernard Madoff brachte seine zumeist gut betuchte Klientel mit einem simplen Pyramidenspiel um den sagenhaften Betrag von 60 Milliarden Dollar. Interessant ist dabei die Untersuchung der Mechanismen, durch die ihm dies gelang. Das Geld akquirierte Madoff über soziale Netzwerke sehr reicher Vermögensbesitzer, mit denen er verkehrte. Diese vertrauten Madoff offenbar blind, da sie sich nicht vorstellen konnten, dass „einer von ihnen" sie betrügen würde. Klar erkennbar ist auch das ausgefeilte Eindrucksmanagement von Madoff. Dies bestand nicht nur in seinem Auftreten gegenüber den potenziellen Investoren, sondern auch in einer Buchhaltung, die immer wieder hohe Gewinne auswies. Dass es sich dabei um pure Fiktion handelte, konnte er lange verbergen. Die Bedeutung dieser Phänomene geht weit über den Fall Madoff hinaus. Der Fall zeigt das Gewicht von Täuschung als dem Spiegelbild von Vertrauenswürdigkeit. Täuschung ist erst in jüngerer Zeit zu einem bedeutenden Untersuchungsbereich in den Sozialwissenschaften geworden. Dabei ergeben sich auch interessante Schnittstellen zu den Naturwissenschaften.

Aus dem Fall Madoff ergibt sich die Frage: Wie war es möglich, dass die Institutionen, die die Wahrhaftigkeit der Bücher und die Zuverlässigkeit der Finanzmarktakteure zu überprüfen hatten, auf den Betrug von Madoff nicht aufmerksam wurden? Ein Versagen von zentralen Institutionen der Vertrauensgenerierung! Denn auch wenn ein Investor nicht selbst die Wahrhaftigkeit der Finanzberichte überprüfen kann, so muss er doch darauf vertrauen, dass die Prüfer und die Börsenaufsicht dies tun. Dass dem nicht so war, lag auch an der verbreiteten ideologischen Vorstellung möglichst ungezügelter Märkte. Die Börsenaufsicht SEC war von Seiten des Staates nicht hinreichend mit Befugnissen und Personal ausgestattet.

LERNEN LÄSST SICH AUS DER FINANZKRISE INSOFERN, DASS ERNSTHAFTE STAATLICHE REGULIERUNG UND KONTROLLE DES GESAMTEN FINANZSEKTORS ZENTRAL FÜR DIE FUNKTIONSFÄHIGKEIT DER MÄRKTE SIND – DIE AUSBEUTUNG VON VERTRAUEN FÜHRT ZU SEINER ZERSTÖRUNG.

Zum Teil hatten die fehlerhaften Informationen ihre Ursache auch in offensichtlichen Interessenkonflikten der Finanzmarktakteure. Ratingagenturen sind Institutionen mit großer Bedeutung für die Herstellung von Vertrauen auf den Finanzmärkten. Ohne zutreffende Bewertungen lassen sich die Risiken von Anlageprodukten für die Investoren nicht beurteilen. Ratingagenturen vergaben vor der Finanzkrise höchste Bewertungen für hypothekenbesicherte Anleihen, von denen sich kurze Zeit später herausstellte, dass sie aufgrund des Rückgangs der Immobilienpreise ausfallen würden.

VERSAGT HABEN DABEI ZENTRALE INSTITUTONEN ZUR HERSTELLUNG VON VERTRAUEN AUF FINANZMÄRKTEN: RATINGAGENTUREN, DIE FINANZMARKTAUFSICHT, NOTENBANKEN, ANALYSTEN. MIT DEM PLATZEN DER SPEKULATIONSBLASE WURDE AUCH DAS VERTRAUEN IN DIESE INSTITUTIONEN BESCHÄDIGT. ES WIEDER AUFZUBAUEN, WIRD LANGE ZEIT DAUERN.

Bei den Ratingagenturen bestand ein offensichtlicher Interessenkonflikt, da die Agenturen nicht nur für die Bewertung von den Emittenten der Anleihen bezahlt wurden, sondern sie auch als Berater an der Konstruktion der Produkte beteiligt waren. Gute Bewertungen sicherten das Geschäft der Ratingagenturen. Als Institution zur Generierung von Informationen, auf deren Wahrhaftigkeit Investoren vertrauen, versagten sie.

Lernen lässt sich aus der Finanzkrise insofern, dass ernsthafte staatliche Regulierung und Kontrolle des gesamten Finanzsektors zentral für die Funktionsfähigkeit der Märkte sind – die Ausbeutung von Vertrauen führt zu seiner Zerstörung und damit zur Implosion von jenen Kooperationsräumen, auf denen die moderne Gesellschaft beruht. Verhindern lässt sich dies nur durch Ehrlichkeit oder durch institutionelle Sicherungen – durch wirksame Kontrolle.

Die Finanzkrise hat ihre Ursache nicht in einer Vertrauenskrise. Sie hat ihre Ursache vielmehr im unkontrollierten Eingehen von spekulativen Risiken: von Wetten, die nicht aufgingen. Die Ursachen hierfür lagen in institutionellen Anreizstrukturen. Viel zu viele Akteure haben den Investmentbanken, Hedgefonds und Analysten zu lange vertraut. In der Hoffnung auf hohe Renditen, um im Wettbewerb zu bestehen und aus individueller Gier. Versagt haben dabei zentrale Institutionen zur Herstellung von Vertrauen auf Finanzmärkten: Ratingagenturen, die Finanzmarktaufsicht, Notenbanken, Analysten. Mit dem Platzen der Spekulationsblase wurde auch das Vertrauen in diese Institutionen beschädigt. Es wieder aufzubauen, wird lange Zeit dauern. Auch hier bietet sich vielfältiges empirisches Material für die Forschung. Tatsächlich sind Fragen der Vertrauenswiederherstellung ein wichtiger Strang in der Forschung über Vertrauen geworden.

Die Kosten des Vertrauensverlustes durch die Finanzmarktkrise tragen wir alle: in Form milliardenschwerer Subventionen zur Rettung des Finanzsystems und des Verlusts an Wirtschaftsleistung. Denn wenngleich die Ursache der Finanzmarktkrise nicht in einer Vertrauenskrise zu suchen ist, so hat sie doch eine solche bewirkt. Sie zu überwinden, bedarf institutioneller Reformen. Grundlage für die politische Durchsetzbarkeit solcher Reformen ist ebenfalls ein Vertrauensverlust: der Verlust des Vertrauens in möglichst ungezügelte Märkte. Wenigstens hier lässt sich der Finanzmarktkrise ein positiver Aspekt abgewinnen.

LITERATUR:

· Beckert, Jens, 2006 und 2008: Trust and Markets. In: Reinhard Bachmann/Akbar Zaheer (eds.), Handbook of Trust Research. Cheltenham: Edward Elgar, 318-331. (2006, 2. Auflage 2008)
· Harrington, Brooke, 2009: Deception. From Ancient Empires to Internet Dating. Stanford: Stanford University Press.
· Möllering, Guido, 2006: Trust: Reason, Routine, Reflexivity. Oxford: Elsevier.
· Piotti, Geny, 2009: German Companies Engaging in China. Decision Making Processes at Home and Management Practices in Chinese Subsidiaries. MPIfG Working Papers 09/14.

PROF. DR. JENS BECKERT
MAX PLANCK INSTITUTE FOR THE STUDY OF SOCIETIES, COLOGNE

The financial crisis – a crisis of trust

On September 17, 2007, long lines began to form outside branches of the British bank Northern Rock. Investors who had deposited their savings with the bank wanted their money back. However, they weren't standing in line because they were planning to spend the cash. They were afraid that the overindebted bank was about to collapse, taking their deposits with it.

The scene was very nearly repeated a year later in Germany. Following the collapse of the US investment bank Lehman Brothers on September 15, 2008, German investors too began to fear for the safety of their deposits. The Bundesbank registered a marked increase in cash withdrawals from ATMs. The fact that this development was halted before queues had time to form at bank counters can be clearly attributed to one thing: To a statement by the German Federal Chancellor and the Finance Minister on October 5, 2008, that the state would guarantee all of the savings that citizens had on deposit with the banks. This guarantee calmed nerves sufficiently for people to leave their money in the bank rather than keeping it at home or in a safe. Whether the state would have been able to make good its promise to guarantee some 568 billion euros is open to question. The amount is double the Federal budget.

The run on the banks that was narrowly avoided in autumn 2008 highlights an indispensible but generally overlooked mechanism by which our economic interactions are coordinated: The mechanism of trust. The act of depositing money with a bank – which is nothing other than making a loan to the bank – is based on trust that the bank will be able to repay this money at any time. If doubts arise as to whether the bank is able or willing to pay, as happened in autumn 2008, this trust is destroyed. Customers demand their money back. A further problem with a bank run is that it develops a momentum of its own. It is quite possible that this very loss of trust will cause the liquidity problems from which the customers standing in line are so eager to protect their deposits. After all, no bank can repay all of its customers' deposits at the same time. For this reason even rumors that a bank is in difficulties are sufficient to trigger a loss of trust that in turn will bring down the bank.

However, in the financial markets the central position of the mechanism of trust is not just restricted to the safety of customers' savings. The financial crisis provided an opportunity to observe what happens when banks cease to trust one another. In what is termed interbank trading, the commercial banks regularly lend one another sums running into billions, generally for very short periods, in order to safeguard their liquidity. The financial crisis brought this interbank trade to a complete standstill. After experiencing the insolvency of Lehman Brothers, no bank could any longer be certain that the other bank to which it was lending several hundreds of millions of euros overnight would by able to repay it the following day. The banks clung on to what liquidity they had. Trust was destroyed.

Had the banks been left exposed solely to the market, the financial system would have collapsed. This market failure was likewise prevented by state intervention. Just as the state had guaranteed the savings of private investors, it now stepped in as lender to the commercial banks. Hundreds of billions of euros were made available by central banks to their commercial brethren. The trust that had vanished from the markets was restored as the state tipped the balance with the weight of its own trustworthiness. The trust that the banks had forfeited was placed instead in the state.

THE ACT OF DEPOSITING MONEY WITH A BANK IS BASED ON TRUST THAT THE BANK WILL BE ABLE TO REPAY THIS MONEY AT ANY TIME.

In the field of economic sociology the study of trust has become an important subject of research over recent years. On the one hand, it is a question of the significance of trust for the efficiency of the economy, and on the other of understanding the basic principles of trust. The present crisis, financial as well as economic, provides a broad range of illustrative material for this research. Because trust is one of those phenomena of social life that remain largely unnoticed all the while they are present. When trust becomes an issue, it has usually vanished.

Trust may be defined as a certain expectation. Namely the expectation on the part of one person, the trust-giver, that the partner with whom he or she is interacting, the trust-taker, will not exploit an advance of some kind for its own advantage. Insofar, trust always presupposes that the other party is able to act freely. Where there is constraint, there is no trust. Because of the fundamental freedom of action on the part of the trust-taker, trust always entails uncertainty. Can I rely on the other party or not? Can the bank really repay my savings, or is it just saying that in order to get its hands on my money?

The sociologist Georg Simmel aptly described trust as a condition midway between knowing and not knowing. The trust-giver may expect that his confidence in the trust-taker will not prove misplaced, but he cannot be entirely certain. Therefore, trust escapes the logic of calculation on which economic theories of rational choice are built. The risk inherent in the act is not calculable. It can only be estimated on the basis of an interpretation of the available information. If one then decides to act, one effectively dismisses the risk. The expectation is that the other party will prove trustworthy, even though the precise opposite may also be the case. In one sense, trust simulates a condition and thereby reduces the complexity of the situation. Trust is a tranquilizer in the face of uncertainty, thereby allowing the interaction to take place.

This immediately becomes obvious if one considers an individual who does not trust. This person would never put his money in a bank, and would only ever pay with the correct coinage for fear of not getting change. Strictly speaking such a person would not accept cash in the first place. Because money is simply a worthless piece of paper bearing a promise that it can be exchanged for useful goods. But who knows? As it aptly states on US bank notes, "In God we trust". People who are devoid of trust are pathological cases. There are such people, though they are few. But experimenting with the idea of a world without trust helps us to understand how central trust is in facilitating cooperation between actors, and thus for an economy based on the division of labor.

THE TRUST THAT HAD VANISHED FROM THE MARKETS WAS RESTORED AS THE STATE TIPPED THE BALANCE WITH THE WEIGHT OF ITS OWN TRUSTWORTHINESS. THE TRUST THAT THE BANKS HAD FORFEITED WAS PLACED INSTEAD IN THE STATE.

Trust creates opportunities for cooperation. Herein lies the central importance of this mechanism for the economy, but also for every other area of social interaction. Contrary to the frequently encountered assertion of a general loss of trust, modern society demands that we trust more and more. A major achievement of modern societies lies in their ability to generate trust on a far larger scale than traditional societies. Trust in traditional societies is concentrated within narrow social bounds – the family, neighborhood and certain closely circumscribed institutions. Modern societies multiply the number of encounters with total strangers and a variety of social institutions and expert systems in which trust is placed. It is the resulting opportunity to cooperate that facilitates creativity, innovation and the ability to access and interact with the whole world – and at the same time leads to risks that in traditional societies are entirely unknown.

But how does trust spread on this scale in modern societies and their economies? Trust does not become blind: It builds on social foundations that enable actors to assess a situation well enough to attain a justified degree of confidence in the intentions of the trust-taker. To hark back to Georg Simmel once again, trust is a condition between knowing and not knowing. It is not simply an unfounded hope.

Institutions are one of the social foundations of trust. One example is the bank deposit protection scheme which gives savers the assurance that in the event that their own bank should collapse, their deposits will be still repaid out of a fund to which all banks jointly contribute. The risk is pooled and trust is dependent instead on one's assessment of the reliability of the protection fund. Investors in Icelandic banks have known for the past two years that such guarantees are not unequivocally to be relied upon. And the guarantee given by the Federal Chancellor in autumn 2008 anticipated that given the scale of the crisis, investors would not trust the deposit protection funds in Germany. If a single bank becomes insolvent these funds can cover the losses, but they cannot cope with the collapse of the entire banking system.

Another example of an institution underpinning trust in relationships of an economic nature is encountered in the case of manufacturers' warranties. Most buyers of used cars are not automotive experts and therefore cannot really judge the condition of the vehicle being offered to them. The seller is an expert, but has no interest in disclosing the vehicle's defects. After all, he or she wants to sell the vehicle for as high a price as possible. Naturally, the buyer knows this. An obvious course of action would be for all those non-experts to withdraw from the market as buyers because they do not trust what the seller says. If such a lack of trust on the part of the buyers prevailed, the market would never get off the ground. One solution to this problem lies in used car warranties in which the seller undertakes to cover the cost of rectifying any defects that may occur for a certain period of time after purchase. The buyer can

now make the purchase with a certain peace of mind, since the seller has no interest in deceiving him or her as to the true state of the vehicle. Or if the seller does so, it is the seller nevertheless who must cover the cost.

In this example too, the focus of trust is shifted: The buyer still has to have confidence in the warranty itself. This institutional underpinning of trust only functions in the marketplace provided an effective legal system exists under which the buyer can expect his or her claims to be satisfied.

Trust in economic relationships, however, is not only safeguarded by institutional means. The reputation of the trust-taker also serves as a foundation. Potential partners draw conclusions based on the past actions of the trust-taker as to whether he or she will be trustworthy in the future. For this purpose it must be possible for potential new partners to monitor the trust-taker's behavior. For trust to be underpinned in this way, a high degree of market transparency is called for. A particularly relevant example of how to generate trust through reputation is provided by the online auction site eBay, where sellers are regularly assessed by buyers.

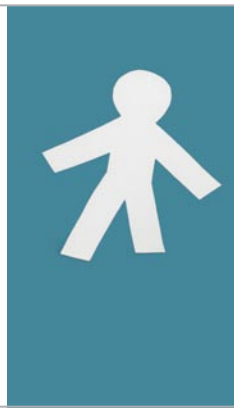
This feedback and the number of transactions already completed by the seller are immediately visible to the bidder. Those who have proven to be reliable in the past are trusted accordingly. Anyone wishing to continue doing business in future will behave honestly in order to avoid negative feedback. Given that the problem of trust is of such overwhelming importance in anonymous transactions conducted via the Internet, it is fair to say that the credibility of the feedback system is central to eBay's business capital. It is not by accident that eBay invests a great deal of money in creating and improving this system.

Social networks are another foundation of trust. These may be family networks, or networks within professions or ethnic communities. The central mechanism by which trust is secured in networks is constituted by the sanctions by which members of a network can be excluded from the benefits of membership in the event that they should commit an abuse of trust. In many countries ethnic minorities are discriminated against when applying for credit, or are turned down entirely by banks for lack of securities.

One reaction to this situation is the emergence of informal systems of lending within ethnic groups. Loans are granted without securities. However, both borrower and lender are members of the same social network, through which the borrower can be kept under observation and sanctions imposed in the event of default. To be excluded from the network means losing one's only source of credit – which is a high price to pay. Lastly, trust is also a product of performance. This mechanism is not separate from the others, on the contrary it goes hand in hand with them. The performance of which trust is a product in this sense is the behavior of the trust-taker in managing the impression he or she makes, indicating his or her worthiness to receive trust and creating a willingness on the part of the trust-giver to extend trust. The professional conduct and demeanor of an airline's employees, including the confident smiles on the faces of the flight attendants, are performative aspects of an image designed to signal trustworthiness.

Imagine a bank that sets up shop in an old barn, with employees dressed in casual clothing sitting behind the counter. Who would entrust a bank like that with his or her money? The way the employees are dressed has nothing to say about the solvency of the bank. But imbued as we are with assumptions of how a respectable bank should look, we interpret this signal as saying precisely that. Such performative aspects of self-presentation are a central factor in the generation of trust. For the very reason that the trustworthiness of the trust-taker cannot be reliably predicted in advance, signals acquire a central significance.

TRUST CREATES OPPORTUNTIES FOR COOPERATION. HEREIN LIES THE CENTRAL IMPORTANCE OF THIS MECHANISM FOR THE ECONOMY, BUT ALSO FOR EVERY OTHER AREA OF SOCIAL INTERACTION.



This also marks a certain crossover. Because trust merely blends out the contingency of the trust-taker's behaviour without actually eliminating the uncertainty, opportunities arise for trust to be abused. The paradox of trust is that it creates opportunities not only for cooperation, but for exploitation as well. In this respect too, the current financial and economic crisis offers a wealth of illustrative material. The financier Bernard Madoff used a simple Ponzi scheme to extract

the fabulous sum of 60 billion dollars from his predominantly well-heeled clients. An examination of the mechanisms by which he succeeded reveals some interesting facts. Madoff acquired the money through the social networks of the super-rich in which he moved. They evidently trusted Madoff blindly because they could not imagine that he would cheat "one of them". The sophistication with which Madoff managed the impression he made is also clear to see. This extended not only to the image he presented to potential investors, but also to the way he kept books that consistently showed high profits. He was able to hide the reality that it was all pure fiction for a long period of time. The significance of these phenomena reaches far beyond the Madoff affair. His case demonstrates the significance of deception as the mirror image of trustworthiness. Deception has only recently become an important area of investigation in the social sciences, and it is one that also has interesting interfaces with the natural sciences.

ONE LESSON THAT CAN BE LEARNED FROM THE FINANCIAL CRISIS IS THAT SERIOUS STATE REGULATION AND OVERSIGHT OF THE ENTIRE FINANCIAL SECTOR IS ESSENTIAL IF MARKETS ARE TO FUNCTION EFFECTIVELY – THE EXPLOITATION OF TRUST LEADS TO ITS DESTRUCTION.

The Madoff case raises the question of how was it possible for the institutions charged with overseeing the accounting and certifying the reliability of participants in the financial markets not to notice Madoff's fraud? This was a failure by the central institutions responsible for the generation of trust! Even if an investor cannot personally verify the truthfulness of financial reports, he or she must have confidence that the auditors and supervisory authorities are doing so. The fact that this did not happen was also attributable to the widespread ideological concept of unfettered markets. The state did not equip its supervisory authority, the SEC, with adequate powers or personnel. The misinformation resulted partially from obvious conflicts of interest on the part of financial market participants. Rating agencies are vital institutions for creating trust in the financial markets. Without accurate ratings it is impossible to assess the risks to investors inherent in investment products. Prior to the financial crisis, rating agencies awarded the highest ratings to mortgage-backed securities which proved worthless in the face of falling real estate prices a short time later. There was a clear conflict of interest here as the rating agencies were not only paid for their assessments by the issuers of these securities, but were also involved as consultants in designing these products. Good ratings were good for the rating agencies' business. As institutions responsible for producing information as to which investors could be trusted to be truthful, they failed.

One lesson that can be learned from the financial crisis is that serious state regulation and oversight of the entire financial sector is essential if markets are to function effectively – the exploitation of trust leads to its destruction and thus to the elimination of opportunities for cooperation on which modern society is founded. This can only be prevented either by honesty or by institutional safeguards – by effective oversight.

The financial crisis did not originate in a crisis of trust. It originated in uncontrolled exposure to speculative risk – to bets that didn't come off. In turn, the causes lay in institutional incentive structures. Far too many participants trusted the investment banks, hedge funds and analysts for too long – in the hope of high returns, in order to survive in the face of competition, and out of individual greed.

The key institutions charged with creating trust in the financial markets failed: The rating agencies, the supervisory authorities that oversee the financial markets, the central banks and even analysts. When the speculation bubble burst, trust in these institutions too was damaged. Restoring this trust will take a long time. Here again we find a wealth of empirical material for scientific study. In fact, issues associated with the restoration of trust have become an important strand of research into trust itself.

We are all paying the price for the loss of trust engendered by the crisis in the financial markets: We foot the bill for the billions poured into subsidies to rescue the financial system, and we suffer the loss of economic output. If the cause of the financial market crisis did not lie in a crisis of trust, it has nevertheless created one. It will require institutional reforms to overcome this crisis. Such reforms are now also politically implementable due to the loss of trust: Our loss of trust in unfettered markets. At least in this respect there is one positive aspect to the financial market crisis.

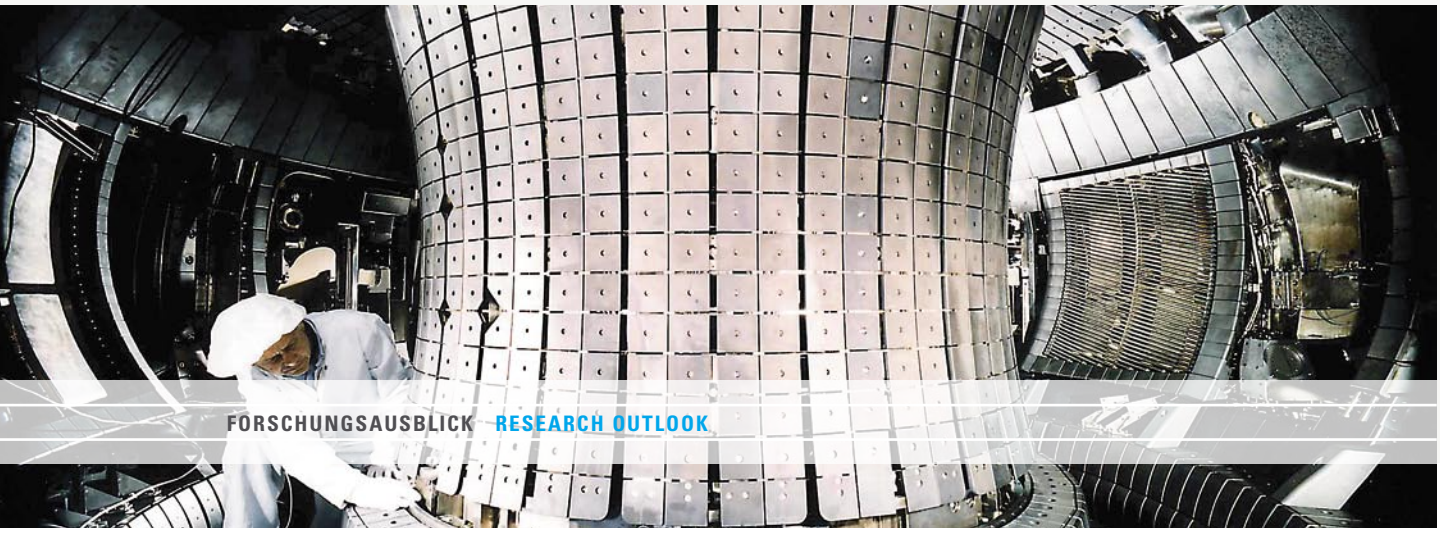
THE KEY INSTITUTIONS CHARGED WITH CREATING TRUST IN THE FINANCIAL MARKETS FAILED: THE RATING AGENCIES, THE SUPERVISORY-AUTHORITIES THAT OVERSEE THE FINANCIAL MARKETS, THE CENTRAL BANKS AND EVEN ANALYSTS. WHEN THE SPECULATION BUBBLE BURST, TRUST IN THESE INSTITUTIONS TOO WAS DAMAGED. RESTORING THIS TRUST WILL TAKE A LONG TIME.

LITERATURE:

- Beckert, Jens, 2006 and 2008: Trust and Markets. In: Reinhard Bachmann/Akbar Zaheer (eds.), Handbook of Trust Research. Cheltenham: Edward Elgar, 318-331. (2006, 2nd edition 2008)
- Harrington, Brooke, 2009: Deception. From Ancient Empires to Internet Dating. Stanford: Stanford University Press.
- Möllering, Guido, 2006: Trust: Reason, Routine, Reflexivity. Oxford: Elsevier.
- Piotti, Geny, 2009: German Companies Engaging in China. Decision Making Processes at Home and Management Practices in Chinese Subsidiaries. MPIfG Working Papers 09/14.

PROF. DR. GÜNTHER HASINGER
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK, GARCHING UND GREIFSWALD

Fortschritte in der Fusionsforschung



Der weltweite Strombedarf wird in diesem Jahrhundert etwa auf das Sechsfache ansteigen, die Hälfte dieses Anstiegs wird nach 2050 erwartet. Experten sind sich einig, dass diese gewaltige Nachfrage auf klimaverträgliche Weise nur durch den massiven Einsatz neuer Energietechnologien gedeckt werden kann. Brückentechnologien für Energieerzeugung und Klimaschutz wie die Kernspaltung von Uran oder die Speicherung von Kohlenstoff in der Erde können uns wertvolle Jahrzehnte Zeit erkaufen, in denen alternative Techniken wie Sonnen- und Windenergie sowie moderne Stromnetze und Speicher ausgebaut werden können. Vielleicht gelingt es sogar, durch die Nutzung von Biomasse oder anderen Technologien bis zum Ende des Jahrhunderts einen Teil des schädlichen CO_2 wieder aus der Erdatmosphäre zurück zu holen. Mit keiner der heute bekannten Techniken wird man jedoch den prognostizierten Energiebedarf alleine decken können. Fusionsenergie, die in gewisser Weise den Prozess der Energieumwandlung der Sterne auf die Erde holt, verspricht gegenüber den bekannten Energiequellen so große Vorteile, dass sich alle Anstrengungen lohnen, um ihre Nutzungsmöglichkeit zu entwickeln. Das globale Energieproblem wird bis 2050 bei Weitem noch nicht gelöst sein. Wenn die Fusionsforschung erfolgreich ist, wird sie jedoch entscheidend dazu beitragen können, den weiterhin steigenden Energiebedarf in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu decken.

EINE BADEWANNE VOLL WASSER UND DAS LITHIUM EINER LAPTOP-BATTERIE KÖNNTEN EINE FAMILIE FÜR 50 JAHRE MIT STROM VERSORGEN.

Die Vorteile der Fusionsenergie liegen auf der Hand: Ihr Brennstoff ist überall auf der Welt fast unbeschränkt verfügbar. Sie benutzt ein heißes Gas – ein „Plasma" – aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, die aus Wasser beziehungsweise Lithium gewonnen werden, das wiederum beispielsweise aus verbrauchten Batterien extrahiert werden kann. Eine Badewanne voll Wasser und das Lithium einer Laptop-Batterie könnten eine Familie für 50 Jahre mit Strom versorgen. Fusionskraft ist eine saubere Energie, es entstehen keinerlei CO_2-Emissionen und keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Die Fusion kann deshalb mit Fug und Recht als eine „regenerative" Energieform angesehen werden. Allerdings ist Tritium ein radioaktives Element und die Wände des Kraftwerks werden durch beim Fusionsprozess erzeugte schnelle Neutronen aktiviert. Die dadurch verursachte Radioaktivität klingt aber innerhalb relativ kurzer Zeit ab und benötigt deshalb kein geologisches Endlager.

Da zu jeder Zeit immer nur eine kleine Menge Brennstoff im Plasma vorhanden ist, gibt es keine Explosionsgefahr und keine Gefahr einer Kernschmelze. Im Gegensatz zu den klassischen erneuerbaren Energien wie Solar-, Wind- und Wasserkraft hat die Fusion jedoch eine extrem hohe Energiekonzentration auf die verbrauchte Fläche gerechnet und damit einen vergleichsweise sehr geringen Landschaftsverbrauch. Sie ist unabhängig von Tages-, Jahres- oder regionalen Schwankungen und deshalb ideal für die Grundlastversorgung von Ballungsräumen sowie der Großindustrie. Wo heute ein Kohle- oder Kernkraftwerk steht, könnte später ein Fusionskraftwerk arbeiten. Die Fusionskraft würde sich deshalb gut in einen Energiemix der Zukunft einfügen.

Die fusionsorientierte Plasmaphysik hat in den letzten Jahrzehnten weltweit gewaltige Fortschritte gemacht. Eindrucks-

voll belegt dies der Anstieg der Fusionsleistung von wenigen Milliwatt in den Siebzigerjahren bis zu dem Weltrekord-Experiment des europäischen Gemeinschaftsprojekts JET (Joint European Torus) in Culham, England, das vor zwölf Jahren kurzzeitig eine Spitzenleistung von 16 Megawatt erreichte. Die Fusionsleistung ist in dieser Zeit um mehr als das Milliardenfache gestiegen – und damit deutlich schneller gewachsen, als sich zum Beispiel die Zahl der Schaltkreise auf Computerchips gemäß dem Mooreschen Gesetz (eine Verdopplung alle 18 Monate) entwickelt. JET hat Bedingungen erreicht, die annähernd dem „Break-Even" entsprechen, d.h. die eingesetzte Heizleistung kann durch die freigesetzte Fusionsleistung wieder gewonnen werden. Der nächste große Schritt auf dem Weg zu einem Kraftwerk ist die internationale Testanlage ITER, die derzeit in Cadarache, Südfrankreich, aufgebaut wird und die zum ersten Mal ein brennendes Plasma erzeugen soll. Insgesamt ist man nur noch etwa eine Größenordnung von dem Zielwert für ein Fusionskraftwerk entfernt.

FÜHRENDE ROLLE DEUTSCHLANDS

Die deutsche Fusionsforschung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und Greifswald (abgekürzt: IPP) und den Forschungszentren in Karlsruhe (KIT) und Jülich (FZJ) ist Teil der europäisch koordinierten und geförderten Fusionsforschung (EURATOM). Zugleich tragen die drei Institute das Programm „Kernfusion" im Forschungsbereich „Energie" der Helmholtz-Gemeinschaft. Stark arbeitsteilig aufgestellt, sind die Institute international sowohl auf vielen Gebieten der Plasmaphysik als auch in der Fusionstechnologie führend. Diese Spitzenposition der deutschen Fusionsforschung bestätigte 2008 eine umfangreiche Begutachtung der Europäischen Union, der „Facilities Review": Neben JET – einst wesentlich von deutschen Instituten mitkonzipiert – haben die Gutachter unter den Plasma-Experimenten Europas nur den beiden deutschen Anlagen ASDEX Upgrade und Wendelstein 7-X höchste Priorität zuerkannt.

Bis zu einem fertigen Kraftwerk sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen nötig. Wesentlich ist zunächst die Entwicklung eines magnetischen Einschluss-Systems, das in einem Grundlastkraftwerk zuverlässig einsetzbar ist. Anlagen vom Typ „Tokamak" – die derzeitigen Zugpferde der Forschung, auf deren Prinzip auch JET und ITER sowie die Garchinger Anlage ASDEX Upgrade basieren – arbeiten bisher nur im Puls-Betrieb. Wichtiges Forschungsziel sind daher sogenannte „Advanced Szenarios", die Langpuls-Betrieb oder sogar den Dauerbetrieb der Tokamaks möglich machen. Eine attraktive Alternative bietet der von vornherein zum Dauerbetrieb fähige Bautyp „Stellarator". Mit dem Aufbau des Stellarator-Experimentes Wendelstein 7-X in Greifswald liegt hier ein besonderer Schwerpunkt des deutschen Fusionsforschungsprogramms. Um die physikalischen Grundlagen für die Auslegung und den effizienten Betrieb künftiger Kraftwerke zu erarbeiten, müssen die bestehenden Experimente JET und ASDEX Upgrade optimal genutzt und die im Bau befindlichen Anlagen ITER und Wendelstein 7-X möglichst zügig fertiggestellt werden. Die experimentellen Arbeiten werden begleitet durch die theoretische Plasmaphysik, die nicht zuletzt wegen der rasanten Entwicklung moderner Hochleistungscomputer gewaltige Fortschritte gemacht hat. Viele experimentelle Ergebnisse können heute durch umfangreiche numerische Simulationen quantitativ nachvollzogen werden.

Ziel ist letztlich ein numerisches Fusionskraftwerk, also Simulationen auf Supercomputern, welche die Experimente an Wendelstein 7-X und ITER auf das Demonstrationskraftwerk hin extrapolieren können.

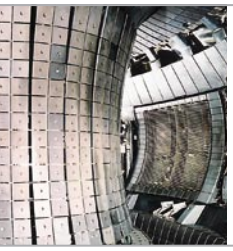
DIE THEORETISCHE PLASMAPHYSIK HAT NICHT ZULETZT WEGEN DER RASANTEN ENTWICKLUNG MODERNER HOCHLEISTUNGSCOMPUTER GEWALTIGE FORTSCHRITTE GEMACHT.

HIGHLIGHTS DER JÜNGSTEN FORSCHUNG

Die erheblichen Fortschritte in der Fusionsforschung sollen anhand einiger im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik erzielter Ergebnisse des Jahres 2009 exemplarisch dargestellt werden: Dies betrifft erstens die „H-Mode", für deren Entdeckung Prof. Friedrich Wagner, Emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied des IPP, vielfach ausgezeichnet wurde, zuletzt mit der Stern-Gerlach-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Bei der H-Mode handelt es sich um eine spontane Selbstorganisation des Plasmas. In der Randzone entsteht dabei eine Transportbarriere, die sich dem Energieverlust durch Turbulenz entgegenstellt. Gleichzeitig steigt der Energieinhalt im Plasmazentrum deutlich an; die Wärmeisolation des Plasmas verbessert sich um mehr als eine Größenordnung. Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1982 basieren alle Konzepte der magnetischen Fusion auf der Verbesserung des Energieeinschlusses durch die H-Mode, insbesondere auch der ITER-Entwurf. Im Jahr 1998 wurde an ASDEX Upgrade unter anderem von Dr. Otto Gruber und Prof. Robert Wolf eine „verbesserte H-Mode" entdeckt: Der Energieeinschluss war nochmals bis zu 50 Prozent besser als bei der normalen H-Mode, allerdings nur bei relativ niedrigen Dichten.

Im weiteren Verlauf gelang es an ASDEX Upgrade, den Einschluss auch bei normalen Fusionsplasmen mit hoher Dichte um 20 bis 40 Prozent zu verbessern – ein äußerst vielversprechendes Ergebnis, da Simulationen für ITER bei einer Verbesserung des Einschlusses um 25 Prozent bereits eine Verdoppelung der Fusionsleistung vorhersagen. Lange Zeit ist es jedoch nicht gelungen, diesen verbesserten Einschluss auch bei dem weltweit größten Fusionsexperiment JET zu erreichen. Erst einer von dem IPP-Physiker Dr. Jörg Hobirk geführten Arbeitsgruppe gelang im letzten Jahr der Durchbruch: Die gezielte Beeinflussung des Stromprofils im JET-Plasma führte zu einer Verbesserung des Energieeinschlusses um 40 Prozent – ein Ergebnis, das für ITER eine erhebliche Erhöhung der Fusions-Energieausbeute erwarten lässt. Die detaillierte Physik der Einschlussverbesserung ist ebenso wie die der H-Mode noch nicht abschließend geklärt. Sie hängt vermutlich mit der Wechselwirkung der Plasma-Turbulenz mit dem Stromprofil zusammen.

Der Transport von Teilchen und Energie in einem Fusionsplasma ist in der Regel durch turbulente Prozesse bestimmt. Auf nur zwei Meter Entfernung herrscht ein Temperaturunterschied von mehr als 100 Millionen Grad. Dieser extrem steile Abfall der Plasmatemperatur bewirkt Instabilitäten, die letztlich zu einer Turbulenz mit charakteristischen Wirbelgrößen im Zentimeterbereich führen. Die Beschreibung von turbulenten Vorgängen ist heute eine der größten Herausforderungen für die theoretische Physik. Zwar gibt es in magnetisierten Plasmen – im Unterschied zu turbulenten Vorgängen in Gasen oder Flüssigkeiten – eine kleinste aufzulösende Skala: den Gyrationsradius der Teilchen im Magnetfeld.



WOLFRAM IST DABEI, SICH ALS WANDMATERIAL FÜR KÜNFTIGE FUSIONSKRAFTWERKE DURCHZUSETZEN.

Trotzdem haben wir es immer noch mit einem Multi-Skalenproblem in Raum und Zeit zu tun, was die Entwicklung hocheffizienter Computercodes erfordert. Im vergangenen Jahr sind in den Theorie-Abteilungen von Prof. Sibylle Günter und Prof. Per Helander erstmals globale (gyro-)kinetische Instabilitäts- und Turbulenzsimulationen – bei denen sich die Plasmaparameter im Simulationsgebiet stark ändern können – mit realistischen Physikmodellen gelungen. Mit diesen Codes hoffen wir in Zukunft zum Beispiel die Entstehung von Transportbarrieren erklären zu können.

Für das Erreichen der Zündung und – bei einem Tokamak – um einen Strom im Plasma zu erzeugen, benötigt ein Fusionsreaktor externe Heizsysteme. Die Injektion schneller Neutralteilchen ist dafür ein aussichtsreicher Kandidat. Eine wesentliche Komponente derartiger Anlagen ist die Quelle für negative Wasserstoff-Ionen, deren Entwicklung in den vergangenen Jahren am IPP unter der Leitung von Dr. Eckehart Speth sehr erfolgreich vorangetrieben und mit dem Schrödinger-Preis der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) ausgezeichnet wurde. Die auf einem neuartigen Konzept beruhende Prototyp-Quelle des IPP wurde 2007 in das ITER-Design übernommen. Allerdings sind die physikalischen Prozesse zur Erzeugung der fragilen negativen Wasserstoff-Ionen in großen Plasmaquellen so komplex, dass es weltweit noch keine Quelle gibt, die alle Anforderungen von ITER erfüllt. Dies ist das Ziel des Großexperimentes ELISE, das – von der Europäischen Gemeinschaft finanziert – derzeit am IPP aufgebaut wird und damit ein zentrales Element des europäischen Fusionsprogramms für die Neutralteilchenheizung an ITER darstellt.

Das Plasmagefäß des Tokamaks ASDEX Upgrade wurde in den letzten Jahren – zum Teil gegen erhebliche Bedenken in der internationalen Fusionsforschung – komplett mit einer inneren Wand aus Wolfram ausgekleidet. Einerseits ist Wolfram das Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt. Andererseits sind Verunreinigungen durch Materialien mit hohem Atomgewicht sehr schädlich für das Plasma, weshalb andere Experimente leichtere Elemente wie Kohlenstoff oder Beryllium bevorzugen. Tatsächlich konnten nach dem Übergang zur reinen Wolfram-Wand auch bei ASDEX Upgrade zunächst nur noch H-Moden bei hohen bis sehr hohen Plasmadichten erreicht werden. Dabei lagen die Einschlussparameter deutlich unter den Werten, die früher bei der mit Kohlenstoff ausgekleideten Wand bei niedrigen Dichten erreicht wurden. In ihren Experimenten erreichten die Arbeitsgruppen um Prof. Hartmut Zohm und Prof. Arne Kallenbach jedoch sukzessive Verbesserungen, vor allem durch die Kühlung des Divertorplasmas durch eingeblasenen Stickstoff.

Der Divertor ist derjenige Bereich der Vakuumkammer, in dem das Plasma mit der Wand in Kontakt kommt, um Verunreinigungen und die „Asche" des Fusionsprozesses – Helium-Atome – abzupumpen. Das Divertorplasma wird gezielt gekühlt, um das Wandmaterial nicht zu überlasten. Der Durchbruch gelang Ende 2008/Anfang 2009: Unter den Bedingungen des gekühlten Divertorplasmas verbesserte sich der Ener-

gieeinschluss deutlich. Inzwischen erreicht ASDEX Upgrade – mittlerweile unter Benutzung des nach einer Havarie im Jahr 2006 reparierten Schwungradgenerators – routinemäßig die H-Mode mit bis zu 30 Prozent verbessertem Einschluss. Wolfram ist daher dabei, sich als Wandmaterial für künftige Fusionskraftwerke durchzusetzen. Derzeit wird bei JET unter dem Titel „ITER-like wall" eine metallische Wand aus einer Mischung aus Wolfram und Beryllium eingebaut. Wenn die ab 2011 geplanten Experimente erfolgreich sind, könnte ITER von Anfang an mit einem Wolfram-Divertor ausgerüstet werden, wodurch in erheblichem Maße Zeit und Kosten gespart werden könnten.

Auch in anderer Hinsicht hat sich in den letzten Jahren Wolfram als sehr vorteilhaft erwiesen: Die im Fusionskraftwerk verwendeten Wasserstoffisotope können nämlich leicht diffundieren und sich in der Wand des Plasmagefäßes einlagern. Vor allem das radioaktive Tritium bereitet dabei Sorgen, weil davon aus Sicherheitsgründen nur eine geringe Menge im Kraftwerk vorhanden sein darf. Von dem gesamten für ITER vorgesehenen Tritium-Inventar von etwa 3 Kilogramm dürfen maximal 700 Gramm in den Gefäßwänden zurückgehalten werden. Kohlenstoff kommt deshalb als Wandmaterial für einen Reaktor nicht in Frage: Es lagert leicht Tritium ein; der radioaktive Staub könnte die Anlage kontaminieren. Anders Wolfram: Wie die IPP-Gruppe „Plasma-Wand-Wechselwirkung" unter Leitung von Dr. Joachim Roth in den letzten Jahren zeigen konnte, sank mit fortschreitender Wolfram-Auskleidung die Deuterium-Einlagerung in ASDEX Upgrade um fast eine Größenordnung. Die Tritium-Einlagerung in Wolfram erreicht demgemäß einen Sättigungswert. Er würde auch bei jahrelangem Betrieb von ITER mit einer Wolfram-Wand um mehr als eine Größenordnung unter den geforderten Grenzwerten liegen. Dies vereinfacht später auch die Zwischenlagerung des neutronenaktivierten Materials aus einem Fusionskraftwerk.

Das Stellarator-Experiment Wendelstein 7-X, das derzeit am IPP-Standort in Greifswald entsteht, ist vermutlich die komplizierteste Fusionsanlage, die bisher gebaut wurde. Es soll zeigen, dass ein Stellarator dem Tokamak ebenbürtig ist und vor allem, dass Fusionsenergie im Dauerbetrieb erzeugt werden kann. Damit stellt es neben ITER einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu einem Kraftwerk dar. Das Projekt Wendelstein 7-X wurde in den späten 1980er-Jahren in Garching begonnen und ab 1996 in Greifswald weitergeführt. Nach Stilllegung des Vorgängers Wendelstein 7-AS in Garching zogen die Physiker bis 2003 nach Greifswald um. Der ursprüngliche Zeitplan sah eine Fertigstellung bereits im Jahr 2006 vor – eine viel zu optimistische Planung, wie das Institut auf schmerzliche Weise realisieren musste. Wendelstein 7-X als ein großes, hoch komplexes und einzigartiges wissenschaftliches Projekt erfordert bei Entwicklung und Aufbau ingenieurtechnische Meisterleistungen und stellte die beteiligten Industriefirmen vor gewaltige Herausforderungen. Im Jahr 2005 wurde die Projektorganisation komplett neu aufgestellt. Mit erheblich mehr Ressourcen und einer Revision der gesamten Planung konnte sich unter der Leitung des technischen Direktors Dr. Remmelt Haange sowie des wissenschaftlichen Direktors Prof. Thomas Klinger das Projekt erholen und mausert sich zunehmend „vom Sorgenkind zum Musterknaben". Der überarbeitete Zeitplan, der die Fertigstellung im Jahr 2014 und den Endausbau bis zum Jahr 2019 vorsieht, ist realistisch und hat seit mehr als zwei Jahren keine wesentlichen Verzögerungen erfahren; auch die Projektkosten blieben im Rahmen.

DAS STELLARATOREXPERIMENT WENDELSTEIN 7-X, DAS DERZEIT AM IPP-STANDORT IN GREIFSWALD ENTSTEHT, IST VERMUTLICH DIE KOMPLIZIERTESTE FUSIONSANLAGE, DIE BISHER GEBAUT WURDE.

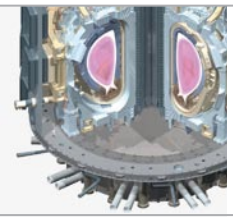
Im Jahr 2009 wurden wesentliche Meilensteine erreicht: Alle 70 supraleitenden Spulen sind bei CEA Saclay bei Tieftemperatur erfolgreich „auf Herz und Nieren" getestet worden, womit eines der größten Probleme der Vergangenheit gelöst werden konnte. Vier Fünftel der Spulen sind bereits in den Magnetmodulen verbaut; das erste der insgesamt fünf Magnetmodule ist fertiggestellt und in seiner endgültigen Position in das thermisch isolierende Außengefäß eingesetzt. So präsentierte sich die Baustelle für Wendelstein 7-X kürzlich auch der Bundeskanzlerin, Frau Dr. Angela Merkel, bei ihrem Besuch in Greifswald. Mit Wendelstein 7-X werde „Fusionsgeschichte geschrieben", erklärte sie sichtlich beeindruckt und sagte der Fusionsforschung und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik weiterhin die Unterstützung der Bundesregierung zu.

BILDNACHWEIS:
Asdex Upgrade: MPI für Plasmaphysik
Schemazeichnung ITER: ITER
Schemazeichnung Wendelstein: MPI für Plasmaphysik

PROF. DR. GÜNTHER HASINGER
MAX PLANCK INSTITUTE FOR PLASMA PHYSICS, GARCHING AND GREIFSWALD

Progress in Fusion Research

The global demand for electricity will increase six-fold this century, with half of this growth coming after 2050. Experts agree that this huge demand can only be covered in a climate compatible manner by the massive use of new energy technologies. Bridging technologies for energy generation and climate protection, such as the nuclear fission of uranium or the underground storage of carbon, can buy us valuable decades in which alternative technologies such as solar and wind energy as well as modern electricity grids and storage can be expanded. Maybe it will even be possible to retrieve some of the harmful CO_2 from the Earth's atmosphere by using biomass or other technologies until the end of the century. None of the technologies known today can satisfy the forecast demand on its own, however.



A BATHTUB OF WATER AND THE LITHIUM FROM ONE LAPTOP BATTERY COULD SUPPLY A FAMILY WITH ELECTRICITY FOR 50 YEARS.

Fusion energy, which in a way fetches the process of energy conversion in the stars down to Earth, promises such great advantages over the known energy sources that it is worth all the effort to develop its possible use. The global energy problem will be nowhere near a solution by 2050. If fusion research is successful, it will be able to make a decisive contribution to satisfying the still rising demand for energy in the second half of the century, however.

The advantages of fusion energy are obvious: The fuel it uses is available in almost unlimited amounts all over the world. It uses a hot gas – a "plasma" – from the hydrogen isotopes deuterium and tritium, which are obtained from water or lithium, which again can be extracted from rocks or used batteries. A bathtub of water and the lithium from one laptop battery could supply a family with electricity for 50 years. Fusion power is a clean energy, it does not produce any CO_2 emissions and no long-lived radioactive waste. Fusion can therefore rightly be considered to be a "regenerative" form of energy. Tritium is a radioactive element, however, and the walls of the power plant are activated by fast neutrons which are produced in the fusion process. But the radioactivity thus produced decays in a relatively short time and therefore does not require a geological final repository. Since there is only a small amount of fuel in the plasma at any one time, there is no danger of explosion and no danger of a core meltdown. In contrast to conventional renewable energies such as solar, wind and water power, fusion has an extremely high energy concentration per unit area and therefore uses comparatively very little land. It is independent of daily, seasonal or regional variations and therefore ideal for supplying the basic load for conurbations and big industry. In the future, a fusion power plant could operate anywhere where there is now a coal-fired or nuclear power plant. Fusion power would therefore fit in well with an energy mix of the future.

Fusion-oriented plasma physics has made great progress worldwide during recent decades. This is impressively demonstrated by the increase in fusion power from a few milliwatts in the seventies to the world record experiment of the European joint project JET (Joint European Torus) in Culham, England, which twelve years ago briefly achieved a peak power of 16 megawatts. During this period there was more than a billion-fold increase in fusion power and it thus grew significantly faster than the increase in the number of circuits on computer chips according to Moore's law (doubling every 18 months), for example. JET achieved conditions which approximately correspond to "break-even", i.e. the heating power input can be recovered by the fusion power released.

The next big step on the path to a power plant is ITER, the international test facility which is currently being constructed in Cadarache, Southern France, and where it is planned to generate a burning plasma for the first time. Overall, only around one order of magnitude is still missing from the target value of a fusion power plant.

GERMANY'S LEADING ROLE

The German fusion research at the Max Planck Institute for Plasma Physics in Garching and Greifswald (abbreviated: IPP) and the research centers in Karlsruhe (KIT) and Jülich (FZJ) is part of the fusion research which is coordinated and supported by Europe (EURATOM). At the same time the three institutes are responsible for the "nuclear fusion" program in the "energy" research field of the Helmholtz Association. The work is strictly divided up and the institutes are at the forefront internationally in many areas of plasma physics as well as in terms of fusion technology. This leading position of German fusion research was confirmed in 2008 by a comprehensive evaluation carried out by the European Union called "Facilities Review": In addition to JET – once significantly co-designed by German institutes – the evaluators conferred the highest priority on only the two German systems ASDEX Upgrade and Wendelstein 7-X out of all the European plasma experiments.

Considerable effort is still required before a power plant can be realized, however. First of all, it is essential to develop a magnetic confinement system which can be reliably used in a base load power plant. Systems of the "tokamak" type – the current workhorses of research, a principle on which JET and ITER and also the ASDEX Upgrade system in Garching are based – have only operated in pulsed mode until now. An important research goal is therefore the so-called "advanced scenarios", allowing long pulse or even continuous operation of the tokamaks. An attractive alternative is the "stellarator" type of design which is able to operate continuously as a matter of principle. The German fusion research program therefore places particular emphasis on the construction of the Wendelstein 7-X stellarator experiment in Greifswald. In order to work out the physical foundations for the design and the efficient operation of future power plants, the existing experiments JET and ASDEX Upgrade must be put to optimum use and the systems under construction, ITER and Wendelstein 7-X, must be finished as quickly as possible.

The experimental work is accompanied by the theoretical plasma physics, which has made great progress not least due to the very rapid development of modern high-performance computers. Many experimental results can now be quantitatively understood thanks to extensive numerical simulations. The goal is ultimately a numerical fusion power plant, i.e. simulations on supercomputers which can extrapolate the experiments on Wendelstein 7-X and ITER to the demonstration power plant.

HIGHLIGHTS OF THE LATEST RESEARCH

The considerable progress in fusion research will be demonstrated using the example of some results achieved at the Max Planck Institute for Plasma Physics in 2009: This concerns firstly the "H-mode", for whose discovery Prof. Friedrich Wagner, Emeritus Scientific Member of the IPP, has been honored many times, most recently with the Stern-Gerlach Medal of the German Physical Society (DPG). The H-mode refers to a spontaneous self-organization of the plasma. A transport barrier is generated at the boundary, where turbulence counteracts the energy losses. Simultaneously, the energy content in the center of the plasma increases significantly; the heat insulation of the plasma is improved by more than one order of magnitude. Since its discovery in 1982 all concepts of magnetic fusion are based on the improvement of the energy confinement by the H-mode, including, in particular, the ITER design. In 1998 a group including Dr. Otto Gruber and Prof. Robert Wolf discovered an "improved H-mode" at ASDEX Upgrade: The energy confinement was again improved by up to 50 percent compared to the normal H-mode, although only at relatively low densities. During the further course of the work, it was possible to also improve the confinement at ASDEX Upgrade for normal fusion plasmas with high density by between 20 and 40 percent – a very promising result, because simulations for ITER predict a doubling of the fusion power when the confinement is improved by only 25 percent.

For a long time, researchers had no success in achieving this improved confinement for the world's largest fusion experiment JET as well until a research group headed by the IPP physicist Dr. Jörg Hobirk managed to achieve the breakthrough last year: The targeted manipulation of the current profile in the JET plasma led to a 40 percent improvement in the energy confinement – a result which means that a considerable increase in the yield of fusion energy can be expected for ITER. The detailed physics of neither the improvement in confinement nor the H-mode have completely been explained. It is probably linked to the interaction between the plasma turbulence and the current profile.

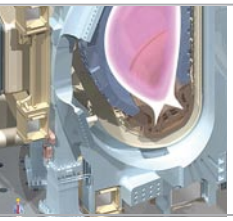
The transport of particles and energy in a fusion plasma are usually determined by turbulent processes. There is a temperature difference of more than 100 million degrees over a distance of a mere two meters. This extremely steep decrease in plasma temperature causes instabilities, which in the end result in turbulences with eddy dimensions characteristically in the centimeter range. The description of turbulent processes is now one of the greatest challenges for theoretical physics. Although magnetized plasmas, in contrast to turbulent processes in gases or liquids, have a minimum scale for resolution - the gyration radius of the particles in the magnetic field - we nevertheless still have to deal with a multi-scale problem in space and time, which requires the development of highly efficient computer codes.

THEORETICAL PLASMA PHYSICS HAS MADE GREAT PROGRESS NOT LEAST DUE TO THE VERY RAPID DEVELOPMENT OF MODERN HIGH-PERFORMANCE COMPUTERS.

Last year the theory departments of Prof. Sibylle Günter and Prof. Per Helander succeeded for the first time in producing global (gyro-kinetic) instability and turbulence simulations – where the plasma parameters in the region simulated can

change greatly – using realistic physical models. In the future, we hope to be able to explain the formation of transport barriers, for example, with these codes.

A fusion reactor needs external heating systems in order to achieve ignition and – for a tokamak – in order to drive its current. The injection of fast neutral particles is a promising candidate for this. An essential component of such systems is a source of negative hydrogen ions, whose development has been very successfully advanced in recent years at the IPP under the direction of Dr. Eckehart Speth and for which he was awarded the Schrödinger prize of the Helmholtz Association (HGF). The IPP's prototype source, which was based on a new concept, was integrated into the ITER design in 2007. The physical processes for the generation of the fragile negative hydrogen ions in large plasma sources are so complex, however, that no source in the whole world yet fulfils all the requirements of ITER. This is the objective of the ELISE large experiment, which is financed by the European Community and is currently being constructed at the IPP, and which thus represents a central element of the European fusion program for the neutral particle heating at ITER.



TUNGSTEN IS THUS ON THE WAY TO GAINING ACCEPTANCE AS THE WALL MATERIAL FOR FUTURE FUSION POWER PLANTS.

The plasma vessel of the ASDEX Upgrade tokamak has been completely lined with an inner wall of tungsten in recent years – in part in the face of considerable objections from the international fusion research community. On the one hand, tungsten is the metal with the highest melting point. On the other, contaminations by materials with a high atomic weight are very harmful for the plasma, which is why other experiments prefer lighter elements such as carbon or beryllium. And indeed, after the transition to a pure tungsten wall, it was initially still only possible to achieve H-modes at high to very high plasma densities, even at ASDEX Upgrade.

The confinement parameters here were considerably below the values which had been achieved earlier at lower densities for the wall lined with carbon. The research groups headed by Prof. Hartmut Zohm and Prof. Arne Kallenbach were able to successively achieve improvements in their experiments, mainly by cooling the divertor plasma with blown-in nitrogen. The divertor is the region of the vacuum chamber where the plasma comes into contact with the wall in order to pump away contaminations and the "ashes" of the fusion process – helium atoms. The divertor plasma is intentionally cooled in order not to overload the wall material. The breakthrough came at the end of 2008/beginning of 2009: Under the conditions of the chilled divertor plasma the energy confinement improved significantly. Meanwhile ASDEX Upgrade – now using the flywheel generator which has been repaired after a breakdown in 2006 – routinely achieves the H-mode with up to 30 percent improved confinement. Tungsten is thus on the way to gaining acceptance as the wall material for future fusion power plants. A metal wall made from a mixture of tungsten and beryllium is currently being installed at JET under the name "ITER-like wall". If the experiments planned from 2011 are successful, ITER could be equipped from the start with a tungsten divertor, which could save a considerable amount of time and money.

Tungsten has also proved to be advantageous in recent years with respect to something else: The hydrogen isotopes used in the fusion power plant can very easily diffuse and be absorbed in the wall of the plasma vessel. The main concern here is the radioactive tritium because, for safety reasons, only a small amount may be present in the power plant. Only a maximum of 700 grams from the total tritium inventory planned for ITER of around 3 kilograms may be retained in the walls of the vessel.

Carbon is therefore out of the question as the wall material for a reactor: It absorbs tritium very easily; the radioactive dust could contaminate the plant. Tungsten is different: As the IPP-group "plasma-wall interaction" headed by Dr. Joachim Roth has been able to show in recent years, with increasing tungsten lining in ASDEX Upgrade the deuterium absorption decreased by almost one order of magnitude. The tritium absorption in tungsten will therefore reach a saturation value. Even if ITER was operated with a tungsten wall over many years, it would still be below the specified limits by more than one order of magnitude. This also subsequently simplifies the intermediate storage of the neutron-activated material from a fusion power plant.

The Wendelstein 7-X stellarator experiment, which is currently being constructed at the IPP site in Greifswald, is probably the most complicated fusion plant ever built. Its aim is to show that a stellarator is equally capable to a tokamak, and primarily that fusion energy can be produced in continuous operation. In addition to ITER it thus represents an important milestone

on the path to a power plant. The Wendelstein 7-X project was started in the late 80s in Garching and continued from 1996 in Greifswald. After the predecessor Wendelstein 7-AS in Garching had been shut down, the physicists all moved to Greifswald by 2003. The original schedule was for completion as early as 2006 – but this planning turned out to be much too optimistic, as the Institute became painfully aware. Wendelstein 7-X is a large, highly complex and unique scientific project and its development and construction required a remarkable engineering feat which posed huge challenges to the industrial companies involved. In 2005 the project organization was completely revised. With considerably more resources and a revision of the complete plan the project was able to recover under the management of the Technical Director Dr. Remmelt Haange and the Scientific Director Prof. Thomas Klinger, and is increasingly being transformed "from problem child to star pupil". The revised schedule, which envisages completion in 2014 and the final stage by 2019, is realistic and has not experienced any significant delays for more than two years; the project costs are also remaining within budget.

In 2009 important milestones were reached: All 70 superconducting coils have been successfully tested at cryogenic temperatures at CEA Saclay, thus solving one of the biggest problems of the past. Four fifths of the coils have already been installed in the magnet modules; the first of a total of five magnet modules has been completed and installed in its final position in the thermally insulating outer vessel. This was how the construction site for Wendelstein 7-X presented itself recently when the Federal Chancellor, Dr. Angela Merkel, visited Greifswald. Wendelstein 7-X was "writing fusion history" she declared, visibly impressed, and promised the continuing support of the Federal Government for fusion research and the Max Planck Institute for Plasma Physics.

THE WENDELSTEIN 7-X STELLARATOR EXPERIMENT, WHICH IS CURRENTLY BEING CONSTRUCTED AT THE IPP SITE IN GREIFSWALD, IS PROBABLY THE MOST COMPLICATED FUSION PLANT EVER BUILT.

IMAGES:
Asdex Upgrade: MPI for Plasma Physics
Technical drawing ITER: ITER
Technical drawing Wendelstein: MPI for Plasma Physics

PROF. DR. DETLEF WEIGEL
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ENTWICKLUNGSBIOLOGIE, TÜBINGEN

Wie passen sich Pflanzen an Umweltveränderungen an?

FORSCHUNGSAUSBLICK | RESEARCH OUTLOOK

Der rasante Klimawandel ist nur eine der Herausforderungen, mit denen Pflanzen und Tiere auf unserem Planeten zurechtkommen müssen. Zusätzlich werden viele Arten mit drastischen Veränderungen ihrer Umwelt konfrontiert, die ebenfalls durch menschliche Aktivitäten verursacht werden. In einer solchen Ära der Unsicherheit stellt sich die Frage, wie sich verschiedene Pflanzen und Tiere an neue Umweltbedingungen anpassen können, die wohl in nicht allzu ferner Zukunft vorherrschen dürften. Die Antwort auf diese Frage hat nicht nur wichtige praktische Konsequenzen für die Menschheit, sondern ist auch von fundamentalem Interesse für alle Biologen, die sich mit der Evolution beschäftigen. Entwicklung und Physiologie werden zwar häufig von der Umwelt moduliert. Diese Flexibilität der Organismen hat jedoch ihre Grenzen, die nur durch Änderungen im Erbgut überwunden werden können. Für Änderungen im Erbgut gibt es zwei wesentliche Quellen: neue Mutationen und Neukombination bestehender genetischer Varianten, die von den Eltern geerbt werden.

DER VOLLSTÄNDIGE VERLUST EINES GENS, DER IN DEN AUGEN DES ZÜCHTERS VORTEILE HABEN KANN, IST SEHR WAHRSCHEINLICH SCHÄDLICH FÜR DAS ÜBERLEBEN DER PFLANZE IN DER WILDNIS.

In der Entwicklungsbiologie stellt man sich schon lange die Frage, wie viele genetische Änderungen erforderlich sind, um Veränderungen im Erscheinungsbild – dem Phänotyp – innerhalb einer wild lebenden Art zu verursachen. Jahrzehntelang war es üblich, große phänotypische Effekte auf Änderungen in einer sehr großen Zahl von Genen zurückzuführen, wobei man jeder einzelnen Variante nur einen sehr kleinen Beitrag zum fraglichen Merkmal beimaß. Folglich müsste die phänotypische Evolution unmerklich langsam ablaufen, was mit der in Fossilfunden beobachteten Geschwindigkeit der Evolution übereinstimmt. Die Entdeckung, dass die durchschnittliche Schnabellänge von Darwin-Finken auf den Galapagos-Inseln von einer Generation zur nächsten um mehrere Prozent abweichen kann, wenn in der Umwelt entsprechend große Veränderungen stattgefunden hatten, war deshalb eine große Überraschung. Gleichermaßen zeigte sich bei Transplantationsexperimenten mit Guppys, dass sich in einer neuen Umwelt nach gerade einmal elf Jahren viele Merkmale wie etwa Alter und Größe bei Geschlechtsreife und die Zahl der Nachkommen messbar und nachhaltig verändert hatten.

In diesem Essay werde ich zunächst erläutern, was wir in den vergangenen Jahren über die Geschwindigkeit und die genetische Grundlage des evolutionären Wandels herausgefunden haben. Danach werde ich die Auswirkungen der technologischen Revolution in der Sequenzierung von DNA beschreiben, und was dies für unsere Fähigkeit bedeutet, die Anpassungsfähigkeit von Organismen an eine sich ändernde Umwelt vorherzusagen.

WIE VIELE GENETISCHE ÄNDERUNGEN SIND ERFORDERLICH, UM EIN MERKMAL ZU VERÄNDERN? ERKENNTNISSE AN NUTZPFLANZEN

Bereits Darwin erkannte, dass die zielgerichtete, künstliche Auslese, wie sie von Züchtern durchgeführt wird, auch ein gutes Erklärungsmodell für die natürliche Evolution liefert. Ein gebührender Anteil dessen, was wir heute über die für die Unterschiede im Phänotyp verantwortliche genetische Vielfalt wissen, stammt aus Arbeiten über domestizierte Arten, vor allem Pflanzen. In den vergangenen Jahren konnten mehrere

Gene, die für wesentliche Veränderungen in der frühen Phase der Domestizierung verschiedener Feldfrüchte verantwortlich sind, identifiziert werden. Das erste derartige Gen war *tb1 (teosinte branched 1)*. Der Mais, wie wir ihn kennen, hat immer nur eine einzige Wachstumsachse, während sein Vorläufer, die Teosinte, viele Triebverzweigungen aufweist, solange sie nicht besonders starken Belastungen ausgesetzt ist oder im Schatten wächst. Die Unterdrückung von Seitentrieben wird durch Aktivierung des *tb1*-Gens erreicht. Während *tb1* in Teosinte nur unter spezifischen Bedingungen aktiv ist, ist die *tb1*-Version im Mais jedoch ständig eingeschaltet, sodass Mais nie lange Seitentriebe ausbildet. Wie erwartet, ist der für diese Änderung verantwortliche Teil des Gens *tb1* nicht derjenige, der für das Protein kodiert, sondern die Kontrollregion, die festlegt, wann und wo das Gen ein- und ausgeschaltet wird. In ähnlicher Weise sind Unterschiede in der Genaktivität für die Effekte des *fw2.2*-Faktors verantwortlich, der für ein Drittel der Größenzunahme unserer kultivierten im Vergleich zu wilden Tomaten verantwortlich ist. Es gibt jedoch auch andere Fälle, in denen die verantwortlichen Gene in domestizierten Arten und deren Vorläufern vergleichbar aktiv sind, stattdessen aber Änderungen in den von ihnen kodierten Proteinen auftreten.

In den beschriebenen Beispielen der Domestikation wurde die Funktion eines Gens zwar verändert, aber das Gen produziert in der Regel immer noch ein aktives Protein. Die Unterschiede bei Feldfrüchten beruhen dagegen oft auf dramatischeren Veränderungen: Ein berühmtes Beispiel ist das Gen, das die Mendelschen Erbsen runzlig macht. Das *Runzlig*-Gen kodiert für ein Enzym, das Stärke modifiziert. In runzligen Erbsen wird das Enzym einfach nicht hergestellt. Es ist erstaunlich, dass der vollständige Verlust eines Gens zumindest in den Augen des Züchters Vorteile haben kann. Wir müssen uns jedoch vor Augen halten, dass viele solcher Varianten oder Polymorphismen sehr wahrscheinlich schädlich für das Überleben der Pflanze in der Wildnis sind. Außerdem gibt es mehrere bemerkenswerte Ausnahmen, wie beispielsweise das Mais-Gen *yellow 1*, das ein für die Vitamin-A-Biosynthese erforderliches Enzym produziert. Dieses Gen ist normalerweise nur in Blättern aktiv, aber eine Mutation in der Kontrollregion aktiviert das Gen in den Körnern des sogenannten Gelben Maises, und verändert auf diese Weise nicht nur die Farbe der Maiskörner, sondern verbessert auch deren Nährwert.

Fazit: Aus der Untersuchung von Nutzpflanzen wissen wir, dass drastische Veränderungen in einzelnen Merkmalen auch durch Veränderungen in *einzelnen* Genen verursacht werden können. Die Veränderungen bei Feldfrüchten können auf drei verschiedene Arten zustande kommen: Sie verändern, wann und wo das Gen aktiv ist, sie greifen in die Aktivität des vom Gen kodierten Proteins ein oder sie schalten das Gen ganz aus.

WIE VIELE GENETISCHE ÄNDERUNGEN SIND ERFORDERLICH, UM EIN MERKMAL ZU VERÄNDERN? ERKENNTNISSE AN WILDPFLANZEN

Obwohl sich schon Darwin mit der Domestikation von Pflanzen und Tieren befasst hat, wissen wir immer noch nicht ganz genau, wie sich die Mechanismen der künstlichen Auslese von denen der natürlichen Auslese unterscheiden. Zum Glück hat unser Wissen über die Gene, die die natürliche Vielfalt von Wildarten steuern, in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Wir kennen inzwischen mehrere Fälle, wo – ähnlich wie bei den domestizierten Arten – Einzelgenmutationen in natürlichen Populationen sehr weitreichende phänotypische Effekte haben. Die von ihnen beeinflussten Merkmale reichen von der Blütenfarbe wilder Petunien und der Fellfarbe bei Hirschmäusen bis hin zu den knöchernen Deckplatten, die den Stichling schützen.

AUS DER UNTERSUCHUNG VON NUTZPFLANZEN WISSEN WIR, DASS DRASTISCHE VERÄNDERUNGEN IN EINZELNEN MERKMALEN AUCH DURCH VERÄNDERUNGEN IN EINZELNEN GENEN VERURSACHT WERDEN KÖNNEN.

Viele Beispiele für solche Gene bei Pflanzen stammen von der Ackerschmalwand *(Arabidopsis thaliana)*. Ein besonders gut erforschtes Merkmal dieser Spezies ist die Regulierung des Blühprogramms bzw. des Blühzeitpunktes. Der Zeitpunkt für die Ausbildung der Blüten ist für jede Pflanze äußerst wichtig. Erzeugt eine Pflanze ihre Blüten in einem Jahr zu spät, bleibt vielleicht vor Eintritt des Winters nicht mehr genügend Zeit für das Heranreifen von Früchten und Samen. Und für die Auskreuzung von Pflanzen müssen die Mitglieder einer Art zur selben Zeit blühen, damit sie sich gegenseitig ihre Pollen zur Verfügung stellen können. An einigen Orten kann es zudem vorteilhaft sein, im vegetativen Zustand zu überwintern, während an anderen Orten eine Strategie der schnellen Blüte angemessener sein kann. *Arabidopsis thaliana* ist im größten Teil der nördlichen Hemisphäre zu finden, von Zentralasien bis zur portugiesischen Atlantikküste und von Nordafrika bis Nordschweden. Zudem tritt bei den Wildstämmen

eine enorme Vielfalt unterschiedlicher Merkmale auf, einschließlich ihres Blühverhaltens. Einige Stämme blühen nur, wenn sie viele Wochen oder Monate mit kalten Temperaturen durchlebt haben (ein als „Vernalisation" bezeichnetes Phänomen), während andere ohne solche Bedingungen blühen. Dieser Unterschied wird durch ein einfaches System gesteuert, das aus den zwei Genen mit der Bezeichnung *FRIGIDA* und *FLC* besteht. *FRIGIDA* begünstigt ein hohes Aktivitätsniveau von *FLC*, dessen Produkt wiederum die Blühinduktion stark unterdrückt. Die Effekte von *FRIGIDA* können durch Vernalisation beseitigt werden, was zu einer allmählichen Verringerung der *FLC*-Konzentration führt.

FÜR *ARABIDOPSIS THALIANA*, DIE EIN AUS ÜBER 120 MILLIONEN BAUSTEINEN BESTEHENDES GENOM AUFWEIST, HABEN WIR HERAUSGEFUNDEN, DASS IN JEDER GENERATION UNGEFÄHR EINE SPONTANMUTATION PRO GENOM AUFTRITT.

Wenn die Kälteperiode lang genug war, bleibt das Aktivitätsniveau des *FLC*-Gens auch bei Wiederanstieg der Temperaturen niedrig und ermöglicht der Pflanze so das Blühen. Viele natürliche *Arabidopsis thaliana*-Sorten weisen verschiedene Mutationen auf, die die *FLC*-Aktivität stark reduzieren und es den Pflanzen so ermöglichen, auch ohne Vernalisation schnell zu blühen. Die Tatsache, dass *FLC*-Mutationen in vielen Wildsorten nachgewiesen werden können und diese viele Male unabhängig voneinander entstanden sind, lässt stark vermuten, dass eine Inaktivierung von *FLC* vorteilhaft sein kann. Genauso bemerkenswert ist das häufige Auftreten von Mutationen, die das *FRIGIDA*-Gen komplett ausschalten. Auch hier wurden viele unabhängige Mutationen festgestellt.

Dies weist darauf hin, dass der Verlust des *FRIGIDA*-Gens in der Wildnis Vorteile haben kann. Die Beobachtung, dass Mutationen, die ein Gen komplett ausschalten, relativ häufig auftreten, war anfangs sehr überraschend. Denn schließlich könnte sich dies ja als Sackgasse für künftige evolutionäre Veränderungen herausstellen. Allerdings existieren Gene oft in mehrfachen, verwandten Kopien. Das gilt auch für *FRIGIDA*. Es ist vorstellbar, dass eines dieser verwandten Gene bei Bedarf die ursprüngliche *FRIGIDA*-Funktion übernehmen könnte. Selbstverständlich würde diese Art der Mutation wohl mit wesentlich mehr Veränderungen einhergehen, als es bei einer einfachen Gen-Inaktivierung der Fall ist.

Damit stellt sich die nächste Frage: Wie oft treten überhaupt neue Mutationen auf? Bis vor Kurzem konnte man dies durch einen Vergleich der Gensequenzen verwandter Spezies nur annähernd berechnen. Zusammen mit Informationen aus dokumentierten Fossilfunden darüber, wann sich diese Arten trennten, konnte man schließen, wie viele Mutationen pro Generation oder pro Jahr aufgetreten sein müssten. Aufgrund der Unvollständigkeit der Fossilfunde sowie von Unsicherheiten bei der Fossildatierung und der Tatsache, dass die Selektion bereits viele neue Varianten eliminiert hatte, waren solche Berechnungen mit erheblichen Fehlerquoten behaftet.

Heute ermöglichen revolutionäre DNA-Sequenzierungstechnologien zum ersten Mal die direkte Messung von Mutationsraten in Echtzeit. Mit diesen neuartigen Methoden können DNA-Analysen für viel weniger als ein Tausendstel der Kosten durchgeführt werden, die noch vor wenigen Jahren angefallen sind.

Dies ermöglicht wiederum exakte Analysen von einer Vielzahl von Genomen. Für *Arabidopsis thaliana*, die ein aus mehr als 120 Millionen Bausteinen bestehendes Genom aufweist, haben wir herausgefunden, dass in jeder Generation ungefähr eine Spontanmutation pro Genom auftritt. Dies mag als eine sehr kleine Zahl erscheinen, bedeutet aber, dass die Evolution mit nur 120 Millionen Individuen die Auswirkungen von Veränderungen in jedem der 120 Millionen Genombausteine durchschnittlich einmal pro Generation testet. Eine einzige *Arabidopsis*-Pflanze kann Tausende von Samen produzieren, sodass die Zahl von 120 Millionen gar nicht so eindrucksvoll erscheint. Das erklärt beispielsweise auch, warum sich in der Praxis so schnell Herbizidresistenzen entwickeln.

Die Tatsache, dass neue Mutationen mit erstaunlich hohen Häufigkeiten auftreten, sagt noch nichts darüber, wie schnell sich eine vorteilhafte Mutation in der Population ausbreitet. Dies hängt sehr stark von der Größenordnung des Vorteils ab, den die Mutation gewährt, und wie oft sie durch Auskreuzung weitergegeben wird, was ihr eine schnellere Kombination mit anderen vorteilhaften Mutationen ermöglicht. Dabei kann die Auslese vorteilhafter Merkmale selbst in natürlicher Umgebung sehr stark sein, wie am Beispiel der oben erwähnten Finken auf den Galapagos-Inseln oder der Guppys zu sehen ist.

VON DER UNTERSUCHUNG VON EINZELGENEN ZUR ANALYSE KOMPLETTER GENOME

Wir kennen inzwischen Dutzende von Beispielen für genetische Veränderungen, die für die Variation in vielen Merkmalen verantwortlich sind. Aber trotz der eindrucksvollen Fortschritte der letzten Jahre haben wir die Geheimnisse, die in den Genomen von Pflanzen, Tieren und Mikroben verborgen sind, nur sehr oberflächlich erkundet. Als Alternative zu den bisher beschriebenen „Bottom-up"-Ansätzen, bei denen man von bekannten Merkmalsunterschieden ausgeht, wählen viele Genetiker zunehmend „Top-down"-Ansätze, bei denen zuerst einmal die Genome vieler Individuen verglichen werden. Gemeinsam mit dem wachsenden Wissen darüber, wie die unterschiedlichen Teile eines Organismus zusammenwirken, sollte uns dies schließlich Voraussagen über das Potenzial einer Art ermöglichen, sich an eine sich verändernde Umwelt anzupassen.

Die Genomforschung ist ein noch recht junges Gebiet, das seine Anfänge in den 1990er-Jahren erlangte, als viele Biologen zu der Erkenntnis kamen, dass eine komplette Bestandsaufnahme des Erbguts eines Organismus immens wertvoll wäre – und zwar auch dann, wenn ein Großteil der Daten nicht von unmittelbarem praktischen Nutzen wäre. Zur Jahrtausendwende lagen dann komplette Genomsequenzen für mehrere Schlüsselorganismen vor. Bis auf eine stammten alle von Arten mit einer geringen wirtschaftlichen Bedeutung, die aber als Modelle für die biomedizinische und die Pflanzenforschung geschätzt wurden: das *E. coli*-Bakterium, die Backhefe *Saccharomyces cerevisiae*, der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*, die Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* und die Pflanze *Arabidopsis thaliana*. Ergänzt wurde diese Liste durch die Sequenz des menschlichen Genoms.

Bezeichnenderweise waren die wissenschaftlichen Veröffentlichungen, in denen über diese Ergebnisse berichtet wurde, alle mit dem Titel „Das Genom von …" überschrieben, wodurch suggeriert wurde, dass Unterschiede in den Genomen von Individuen derselben Art zum großen Teil unerheblich seien. Dies ist natürlich nicht der Fall, und so bestand die nächste Phase darin, individuelle Sequenzdifferenzen zu identifizieren. Dabei konzentrierte man sich zuerst auf Stellen des Genoms, an denen nur eine einzige DNA-Einheit, ein Nukleotid, mutiert wurde: die Single-Nukleotid-Polymorphismen oder kurz SNPs.

Weil kurze Blöcke benachbarter SNPs typischerweise gemeinsam vererbt werden, dachte man, dass man eine Teilmenge aller SNPs als Stellvertreter für andere Polymorphismen verwenden könne. Diese SNPs sollten dann als Marker für größere Abschnitte dienen, in denen verschiedene Individuen alternative Varianten aufwiesen, sogenannte Haplotypen. Ein erstes Ziel war es, mithilfe von Hunderttausenden von SNPs eine Haplotypenkarte für das gesamte Genom zu erstellen.

Die erste vollständige Haplotypenkarte beschrieb die Variation zwischen Genomen verschiedener Menschen. Die zweite Haplotypenkarte war bereits die, die wir vor einigen Jahren für *Arabidopsis thaliana* erstellt haben. Später unterstützten wir Kollegen, die am International Rice Research Institute auf den Philippinen und an zahlreichen wissenschaftlichen Einrichtungen in den USA tätig waren, bei der Erstellung einer Haplotypenkarte für Reis. Zwei weitere wichtige Spezies, für die inzwischen eine derartige Ressource zur Verfügung steht, sind die Labormaus und der Mais. Um eine Haplotypenkarte zu nutzen, muss man SNPs, die als Stellvertreter für jeden Haplotypblock dienen, in einer möglichst großen Zahl von Individuen untersuchen, für die entweder Phänotypen bekannt sind oder einfach ermittelt werden können. Für *Arabidopsis thaliana* haben unsere Kollegen bereits die Analyse von Haplotypenkarten-SNPs für über 1.000 verschiedene Stämme abgeschlossen.

Zu den neuen Erkenntnissen, die wir uns daraus erhoffen, zählt ein besseres Verständnis der innerartlichen Vielfalt: Wie viele Regionen des Genoms scheinen beispielsweise unter einer besonders strengen Auslese gestanden zu haben und enthalten deshalb möglicherweise Gene und Polymorphismen, die für die Anpassung an aktuelle Umweltveränderungen verantwortlich sind? Eine direktere Verwendung solcher Daten ist ihr Einsatz in genomweiten Assoziationsstudien. Dahinter steckt eine einfache Idee: dass vor langer Zeit aufgetretene und daher häufig vorkommende Mutationen für den Großteil der phänotypischen Vielfalt in einer Art verantwortlich sind. Wenn dies der Fall ist, sollten Individuen, die sich in bestimmten Merkmalen ähneln, auch ähnliche Mutationen (denn das sind Sequenzpolymorphismen) aufweisen.

In der Praxis sind dazu jedoch zahlreiche Probleme zu überwinden. Zunächst wird sich aufgrund der enormen Zahl von Polymorphismen (Hunderttausende bis Millionen), die untersucht werden müssen, recht oft rein zufällig eine sehr hohe Korrelation von bestimmten Haplotypen mit einem bestimmten Merkmal ergeben. Daher ist es entscheidend, dies gründlich statistisch zu testen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass Individuen mit derselben geografischen Herkunft oft stärker miteinander verwandt sind und deshalb mehr über das gesamte Genom verteilte Polymorphismen

gemeinsam haben als Individuen, die aus weit entfernten Regionen kommen.

Selbst wenn sich eine lokale Gruppe durch ein spezifisches Merkmal auszeichnet, ist es deshalb schwierig, die dafür verantwortliche Sequenzvariante zu finden, da diese Gruppe viele Polymorphismen teilen wird, die nicht mit dem betreffenden Merkmal verbunden sind. Dennoch haben wir inzwischen festgestellt, dass genomweite Assoziationsstudien in *Arabidopsis thaliana* erfolgreich sein können, zum Beispiel für Merkmale, die mit der Fähigkeit der Pflanze zusammenhängen, sich gegen Pathogene zu verteidigen. Ähnliche Erfolge wurden beim Menschen verzeichnet – mit einem wesentlichen Unterschied: Die von uns identifizierten Gene bewirken in der Regel einen sehr großen Teil der beobachteten Unterschiede, während beim Menschen einzelne Polymorphismen oft nur für den Bruchteil eines Prozents der Variation des betreffenden Merkmals verantwortlich sind. Der Grund ist vermutlich, dass Humangenetiker besonders an nachteiligen Merkmalen, wie Krankheitsneigungen, interessiert sind, während es sich bei *Arabidopsis thaliana* hautsächlich um vorteilhafte Eigenschaften dreht.

VON HAPLOTYPENKARTEN ZU ARTWEITEN BESTANDSAUFNAHMEN GENETISCHER VIELFALT

Neben ihrem Nutzen hatten die ersten Haplotypenkarten auch einen Mangel: Sie erfassten nur einen Bruchteil aller Sequenzvarianten im Genom. So kann man zwar einen Abschnitt des Genoms finden, der mit einem bestimmten Merkmal assoziiert ist. Weil es aber keine vollständigen Informationen über diese Region gibt, muss in einem weiteren Schritt die wahrscheinlichste Sequenzänderung identifiziert werden, die bei verschiedenen Individuen für Unterschiede in der Genaktivität verantwortlich ist. Zudem sind Haplotypen ein idealisiertes Konzept, das davon ausgeht, dass alle relevanten Mutationen vor sehr langer Zeit aufgetreten sind und bestimmte Abschnitte im Genom, die Haplotypen eben, immer gemeinsam vererbt werden. In der Realität variieren Haplotypen allerdings kontinuierlich, und die Übergänge zwischen benachbarten Haplotypblöcken sind nicht immer scharf definiert. Ein enormer Fortschritt wäre deshalb die umfassende Kenntnis aller Sequenzvarianten im Genom. Abhilfe schafft, dass die Kosten für DNA-Sequenzierungen seit Abschluss der ersten Genomprojekte vor zehn Jahren stark gefallen sind: Während die erste vollständige Sequenz eines menschlichen Genoms noch die enorme Summe von 3 Mrd. US-Dollar verschlang und für ihre Erstellung mehr als zehn Jahre benötigt wurden, kann heute ein gesamtes Genom innerhalb von ca. einer Woche für etwa 10.000 US-Dollar sequenziert werden. Beim weiteren drastischen Rückgang der Sequenzierungskosten und dem phänomenalen Zuwachs der Sequenzierungsgeschwindigkeit ist zudem noch kein Ende in Sicht. Das 1.000-Dollar-Humangenom ist wahrscheinlich nur noch eine Frage von ein bis zwei Jahren.

Vor diesem Hintergrund initiierten unsere Kollegen aus der Humangenetik Anfang 2008 das Projekt der 1.000 Humangenome, das *1000 Genomes Project*. Aus vergleichbaren Gründen haben wir zur selben Zeit für ein 1.001-Genome-Projekt für *Arabidopsis thaliana* plädiert. Anfang 2010 hatten wir bereits die Genome von über 100 Stämmen analysiert. Das Projekt ist auf gutem Wege, irgendwann in der ersten Jahreshälfte 2011 beendet zu werden. Es liefert uns nicht nur eine sehr nuancierte Vorstellung über die SNPs, die für Unterschiede in der Aktivität der Gene verantwortlich sein können, sondern erlaubt es uns auch, größere Veränderungen aufzudecken. Deren Ausmaß ist nämlich sehr überraschend, und es gibt Dutzende von Genen, welche die eine Pflanze (oder der eine Mensch) hat und die dem Nachbarn fehlen, und umgekehrt. Dieser Verlust oder Gewinn vollständiger Gene wird üblicherweise als strukturelle Variation bezeichnet.

UNSER TRAUMZIEL: ANPASSUNGEN VORHERSAGEN ZU KÖNNEN

Ich habe erläutert, wie wir mithilfe der genomweiten Assoziationskartierung Sequenzvarianten aufspüren können, die einer Pflanze helfen, sich an bestimmte Umweltsituationen anzupassen. Dies funktioniert selbst dann, wenn vorher noch gar nichts über die verantwortlichen Gene bekannt war. Zunehmend wollen wir aber auch den umgekehrten Weg beschreiten und direkt aus Sequenzinformationen die Eigenschaften einer Pflanze vorhersagen. Wissenschaftler aus aller Welt beschreiben in immer größeren Einzelheiten die genetischen Netzwerke, die sehr verschiedene Merkmale kontrollieren – vom Blattwachstum über die Blütenbildung und die Wurzelentwicklung bis hin zur Pathogenresistenz und Trockenheitstoleranz.

Darauf aufbauend ist es ein gemeinsames Ziel vieler Kollegen, die Biologie auf der Grundlage eines Verständnisses des Gesamtsystems von einer überwiegend beschreibenden Disziplin in eine Wissenschaft mit Vorhersagekraft zu transformieren. Das langfristige Ziel dieser zukünftigen *Systembiologie* besteht darin, Computermodelle zu entwickeln, die die unerhörte Vielzahl von dynamischen Interaktionen zwischen Molekülen und Zellen in einem Organismus erfassen und zu-

dem externe Faktoren wie Licht, Temperatur oder Wasserverfügbarkeit berücksichtigen. Mit solchen Modellen werden wir sowohl die Konsequenzen einer Veränderung in den Kontrollnetzwerken als auch die Auswirkungen einer sich wandelnden Umwelt simulieren können. Wir können dann fragen, wie sich Änderungen in individuellen Netzwerkkomponenten, die wir aus der DNA-Sequenz ableiten werden, auf die Fähigkeit verschiedener Sorten von *Arabidopsis thaliana* auswirken, sich an unterschiedliche Umweltverhältnisse anzupassen. Unter den von uns bereits identifizierten Sequenzpolymorphismen sind Tausende, die sich drastisch auf die Integrität von Genen auswirken, und wir werden diese als Erste unter die Lupe nehmen. Je mehr wir über die Gene und ihre Produkte wissen, umso eher sind wir auch in der Lage, die Auswirkungen noch subtilerer Veränderungen vorherzusagen, wie beispielsweise des Austausches spezifischer Aminosäuren in Proteinen.

Letztendlich wollen wir diese Ansätze auf jede Pflanze ausdehnen, die für die Landwirtschaft von Bedeutung ist oder eine entscheidende Rolle in einem Ökosystem spielt. Nach umfassender Kartierung der Sequenzvariation, die in der gesamten Art auftritt, möchten wir zunächst die bestehenden genetischen Netzwerke rekonstruieren, die in jedem der untersuchten Individuen vorhanden sind. Auf der Grundlage dieser Informationen wollen wir vorhersagen, wie sich eine konkrete Sorte unter einer Vielzahl unterschiedlicher Umweltszenarien verhalten wird. Zudem können wir genetische Netzwerke erforschen, die erst aus Neukombinationen bestehender Sequenzvarianten hervorgehen, wie sie durch Kreuzung verschiedener Eltern entstehen.

Von besonderem Interesse sind Kombinationen, die ein Überleben unter Bedingungen ermöglichen würden, der die Art derzeit noch nicht ausgesetzt ist. Im Falle von Nutzpflanzen würden solche Vorhersagen es erlauben, auf einer besseren Grundlage Entscheidungen bei der Züchtung neuer Sorten zu treffen. Ich gebe zu, dass die Vorhersage des Verhaltens biologischer Systeme eine gewaltige Herausforderung darstellt. Die gerade in den letzten Jahrzehnten erzielten atemberaubenden Fortschritte in der Biologie geben mir jedoch Hoffnung, dass dieser Traum in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren in Erfüllung gehen könnte.

EIN WICHTIGES ZIEL IST ES, DIE BIOLOGIE AUF DER GRUNDLAGE EINES VERSTÄNDNISSES DES GESAMTSYSTEMS VON EINER ÜBERWIEGEND BESCHREIBENDEN DISZIPLIN IN EINE WISSENSCHAFT MIT VORHERSAGEKRAFT ZU TRANSFORMIEREN.

PROF. DR. DETLEF WEIGEL
MAX PLANCK INSTITUTE FOR DEVELOPMENTAL BIOLOGY, TÜBINGEN

Changing Environment – Changing Plants

The rapidly changing climate is but one of the challenges faced by plants and animals on this planet. In addition, many species have to cope with drastic alterations of their environment as a consequence of other human activities. In such an era of uncertainty, a pressing question is how different plants and animals can adapt to new environmental conditions, such as the ones that may prevail in the not so distant future. The answer to this question has not only important practical consequences for humanity, but is also fundamentally interesting to all students of evolution. Although the development and physiology of organisms often varies with the environment, there are limits to the plasticity of an individual animal or plant. Such limits can only be overcome by changes in the genetic make up, for which there are two primary sources: new mutations, and new combinations of existing variants inherited from different parents.

IT MAY SEEM SURPRISING THAT COMPLETE LOSS OF GENE FUNCTION CAN HAVE ADVANTAGES, AT LEAST IN THE EYE OF THE BREEDER, BUT ONE NEEDS TO REMEMBER THAT MANY SUCH VARIANTS ARE VERY LIKELY HARMFUL TO THE SURVIVAL OF THE PLANT IN THE WILD.

A long-standing question in evolutionary biology has been how many changes are required to make a difference in the appearance, or phenotype, of a wild species. For many decades, the conventional wisdom was that large phenotypic effects are due to changes in a very large number of genes, with each variant making only a very small contribution to the trait in question. As a corollary, phenotypic evolution should proceed imperceptibly slowly, which was also in agreement with the speed of change observed in the fossil record.

Therefore, the discovery that the average bill size of Galapagos finches could vary by several percent from one generation to the next, if there were large changes in the environment, was quite a surprise. Similarly, transplantation experiments with guppy fish revealed that after only eleven years in a new ecological setting, many different traits, including age and size at maturity and offspring number, had measurably and robustly changed.

In this essay, I will first review what we have learned about the speed and genetic basis of evolutionary change in the past few years. I will then discuss the impact of the current technological revolution in DNA sequencing on our ability to predict the adaptability of organisms to a changing environment.

HOW MANY GENETIC CHANGES ARE NEEDED TO ALTER A TRAIT? LESSONS FROM CROPS

Darwin realized that artificial selection exerted by breeders provided a good model for understanding evolution in nature, and a fair share of what we know today about the genetic variants responsible for phenotypic differences comes from work on domesticated species, especially plants. Several genes responsible for the key changes that occurred early during domestication of different crops have been identified in recent years. The first was *tb1 (teosinte branched 1)* in maize. Modern maize always has only a single axis of growth, while its progenitor teosinte has many branches, unless it is stressed or shaded. The suppression of side branches is achieved by activating the *tb1* gene. In contrast to the situation in teosinte, where *tb1* is active only under specific conditions, the *tb1* version of maize is stuck in the "on" position, and maize therefore never produces long side branches. As expected, the part of the *tb1* gene responsible for this change is not the one that gives rise to the protein, but the control region, which determines when and where the gene is switched on or off. Likewise, differences in the activity of the *fw2.2* gene account for about a third of the size increase between wild and domesticated tomatoes. However, there are also other cases where the function of the encoded proteins varies, rather than the level of gene activity.

The factors underlying the domestication of crops, which usually involve changes, but not a total loss of gene activity, contrast with the genetic changes known to cause varietal differences within crops. One celebrated example is the gene that caused Mendel's peas to be wrinkled. The *wrinkled* gene encodes an enzyme that modifies starch. In wrinkled peas, the enzyme is simply not made. It may seem surprising that complete loss of gene function can have advantages, at least in the eye of the breeder, but one needs to remember that many such variants or polymorphisms are very likely harmful to the survival of the plant in the wild. In addition, while inactivated genes seem to dominate the list of factors that endow varieties with their specific characteristics, there are several notable exceptions, such as the maize *yellow 1* gene, which produces an enzyme required for vitamin A biosynthesis. This gene is normally only active in leaves, but a mutation in the control region activates the gene in kernels of so-called yellow corn, thus not only changing their color, but also improv-

ing their nutritional value. In conclusion, an important lesson that we have learned from the analysis of crop species is that individual genes can cause drastic changes in specific traits. Moreover, the underlying changes in the genetic code can affect when and where a gene is active, change the activity of the protein made by the gene, or simply knock out the gene.

HOW MANY GENETIC CHANGES ARE NEEDED TO ALTER A TRAIT? LESSONS FROM WILD PLANTS

Despite Darwin's insightful comments on domesticated plants and animals, it is still not entirely clear how much natural selection differs from artificial selection. Fortunately, our knowledge of genes controlling natural variation in wild species has increased substantially in the past few years. Similar to what has been found for domesticated species, we now know of several cases where single-gene mutations in natural populations have very large phenotypic effects. The traits that they affect range from flower color in wild petunias and coat color in deer mice to the bony plates protecting stickleback fish.

In plants, many examples of such genes are from mouse-ear cress (*Arabidopsis thaliana*). One particularly well-researched trait in this species is the onset of flowering, or flowering time. When to develop flowers is a very important decision for any plant. If a plant makes flowers too late in the year, there might not be enough time left for the fruits and seeds to ripen before winter sets in. For outcrossing plants, members of a species need to flower at the same time, so that one individual can provide pollen for another. In addition, it might be best to overwinter in the vegetative state in some places, while in others a rapid flowering strategy might be more appropriate. *Arabidopsis thaliana* is found across much of the Northern hemisphere, from Central Asia to the Atlantic coast of Portugal, and from North Africa to Northern Sweden. Accordingly, there is tremendous variation among wild strains in many traits, including their flowering behavior. Some strains will only flower when they have experienced many weeks or months of cold temperature, a phenomenon called vernalization, while others will flower without experiencing prolonged cold periods. This difference is controlled by a simple system of two genes, called *FRIGIDA* and *FLC*. *FRIGIDA* promotes high activity levels of *FLC*, a strong repressor of flowering. The positive effects of *FRIGIDA* can be overcome by vernalization, which leads to a gradual decline in *FLC* levels. If the cold period was long enough, *FLC* levels will stay low even when temperatures become warmer again, allowing the plant to flower. Natural *Arabidopsis thaliana* strains often carry different mutations that strongly reduce *FLC* activity, allowing these plants to flower quickly even without vernalization. The fact that a large fraction of wild strains have sustained such mutations, and that these have occurred many times independently, strongly suggests that inactivation of *FLC* can be advantageous. As remarkable is the frequent occurrence of mutations that completely knock out the *FRIGIDA* gene. Like *FLC*, many independent mutations have been found, indicating that *FRIGIDA* function has been repeatedly lost because its loss confers certain advantages in the wild. The observation that mutations that completely knock out activity of a gene can be rather common was very surprising. After all, this would appear to be a dead end for future evolutionary changes. However, many genes, including *FRIGIDA*, have multiple, related copies. One could imagine that if the need arises, one of these related genes could take over the original *FRIGIDA* function. Obviously, this type of mutation would likely involve many more changes than a simple gene inactivation.

This begs the next question – how often do new mutations arise in the first place? Until recently, this could only be estimated by comparing the gene sequences of related species. Together with information from the fossil record on when these species separated, one could then infer how many mutations might have occurred per generation or per year. Because of the incompleteness of the fossil record, uncertainties in dating fossils, and the fact that selection had already eliminated many new variants, such estimates had a considerable margin of error. New, revolutionary DNA sequencing technologies have now for the first time allowed direct measurement of mutation rates in real time. With these new methods, DNA can be analyzed for a thousandth or less of the cost required just a few years ago, allowing for a very accurate analysis of large numbers of genomes.

AN IMPORTANT LESSON THAT WE HAVE LEARNED FROM THE ANALYSIS OF CROP SPECIES IS THAT INDIVIDUAL GENES CAN CAUSE DRASTIC CHANGES IN SPECIFIC TRAITS.

For *Arabidopsis thaliana*, which has a genome of about 120 million individual building blocks, or nucleotides, we have found that an individual genome experiences about one spontaneous mutation every generation. This mutation rate might seem small, but it actually means that with only 120 million

individuals, every possible change in the genome occurs on average once per generation! If we consider that single Arabidopsis plant can produce thousands of seeds, then 120 million no longer appears to be such an impressive number. It also explains why, for example, herbicide resistance in the field appears so quickly. That new mutations occur at perhaps surprisingly high rates does not yet tell us how quickly an advantageous mutation will spread through the population. This is very much dependent on the magnitude of the advantage it confers, and how often it is passed on by outcrossing, which allows it to be more quickly combined with other advantageous mutations. However, selection on advantageous traits can be very strong, even in natural settings, as in the case of the Galapagos Finches or the guppies mentioned above.

FROM THE STUDY OF SINGLE GENES TO THE ANALYSIS OF ENTIRE GENOMES

We now have dozens of examples of genetic changes responsible for variation in many suites of traits, but despite the impressive progress made in the past few years, we have barely scratched the surface of the secrets locked in the genomes of plants, animals and microbes. As an alternative to the sort of bottom-up approaches discussed so far, many geneticists are turning increasingly to top-down approaches, in which the genomes of many individuals are compared. Together with increasing knowledge on how the different parts of an organism work together, this should eventually allow us to make predictions about the potential of a species to cope with a changing environment.

FOR ARABIDOPSIS THALIANA, WHICH HAS A GENOME OF ABOUT 120 MILLION INDIVIDUAL BUILDING BLOCKS, OR NUCLEOTIDES, WE HAVE FOUND THAT AN INDIVIDUAL GENOME EXPERIENCES ABOUT ONE SPONTANEOUS MUTATION EVERY GENERATION.

Genome sciences came into their own in the 1990s, when a large fraction of biological scientists began to support the vision – initially held by only a few – that having a complete inventory of the genetic information in an organism would be immensely valuable, even if the useful bits could not be immediately understood. At the turn of the millennium, complete genome sequences for several key organisms were delivered. All but one were from species that had little economic value, but were prized as models for biomedical and plant research: the bacterium *E. coli*, baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae,* the nematode *Caenorhabditis elegans*, the fruit fly *Drosophila melanogaster*, and the plant *Arabidopsis thaliana*. This list was rounded out by the first human genome sequence.

Notably, the scientific articles reporting these achievements were all entitled "The genome of …", suggesting that any differences in the genomes of individuals of the same species were trivial. This is of course not the case, and the next phase was to identify individual sequence differences, with the initial focus on positions where only a single DNA unit, a nucleotide, was changed: single nucleotide polymorphisms, or SNPs. Because short blocks of adjacent SNPs are typically inherited together, it was thought that one could use a subset of all SNPs as proxies for other polymorphisms that distinguished alternative blocks of variants, called haplotypes.

Human geneticists took the lead in developing the first haplotype map. The second haplotype map was the one we produced for *Arabidopsis thaliana* a few years ago, and we subsequently helped colleagues from the International Rice Research Institute in the Philippines and various academic institutions in the US to generate a haplotype map for rice. Two other important species for which such a resource has become available are the laboratory mouse and maize. To exploit the haplotype map, SNPs that tag each haplotype need to be analyzed for a large number of individuals for which phenotypes are either known, or can be readily obtained.

For *Arabidopsis thaliana*, our colleagues have almost completed the analysis of haplotype map SNPs for over 1000 different strains. One of the insights that we hope to gain from this is a better understanding of the history of the species. For example, how many regions of the genome look like they have been under particularly strong selection and are thus candidates for containing genes and polymorphisms responsible for adaptation to recent changes in the environment?

A more direct use of these data is in genome-wide association studies. The idea behind them is quite simple: to identify DNA sequence variants that are found preferentially in those individuals characterized by a certain attribute, such as small size or early flowering. In practice, however, there are a number of obstacles that need to be overcome. First, because of the very large number of polymorphisms being

investigated, from hundreds of thousands to millions, once in a while there will be a very good association with a particular trait purely by chance. It is therefore essential to perform a large number of statistical tests.

A second difficulty is that individuals from the same geographic place are overall more related to each other than to more distant strains. Thus, even if a local group is characterized by a specific trait, it is difficult to find the responsible sequence variant, since this group will share many polymorphisms that are not connected to the trait of interest. Nevertheless, we have already found that genome-wide association studies in *Arabidopsis thaliana* can work for several traits, including ones that are related to the ability of a plant to defend itself against pathogens. Similar results have been reported for humans, but unlike the genes that we have identified for *Arabidopsis thaliana*, which are often responsible for a large proportion of the observed variation, individual polymorphisms in humans often account for a mere fraction of a percent in the variation of the trait of interest. A likely cause for this difference is that the focus in human genetics is on deleterious traits (those causing disease), while we are more interested in advantageous traits.

FROM HAPLOTYPE MAPS TO SPECIES-WIDE INVENTORIES OF GENETIC VARIANTS

Despite their usefulness, a shortcoming of the original haplotype maps was that they included only a fraction of all sequence variants in the genome. Thus, one can discover a region of the genome associated with a trait of interest, but because complete information for this region is lacking, further work is required to identify the most likely sequence change responsible for differences in gene activity in different individuals. Furthermore, haplotypes are an ideal concept, assuming that all relevant mutations occurred a very long time ago, and that certain blocks of the genome are always inherited together. In reality, haplotypes are continuously diversifying, and the blocks of linked variants are longer in some groups of individuals and shorter in others. A great improvement would therefore be the complete knowledge of all sequence variants in the genome.

Fortunately, since completion of the first genome projects ten years ago, the costs of DNA sequencing have dropped precipitously: while the first human genome sequence required the substantial sum of 3 billion US dollars, and took about ten years to assemble, an entire human genome can now be sequenced within a week or so for 10,000 dollars. Moreover, there is no end in sight for this incredible fall in sequencing costs and phenomenal gain in sequencing speed. The 1,000-dollar human genome is probably only one or two years away. Against this background, our colleagues in human genome sciences announced the 1000 Genomes project for humans at the beginning of 2008. In the same spirit, we have been advocating a 1001 Genomes project for *Arabidopsis thaliana*. At the beginning of 2010, the genomes of more than 100 strains had been analyzed, and the project is on track to be finished sometime in the first half of 2011. In addition to providing a much more detailed picture of SNPs that could be responsible for differences in the activity of genes, the complete genome sequences are revealing the surprising extent of larger-scale changes, such as the loss and gain of entire genes, commonly referred to as structural variation.

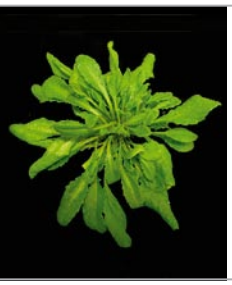
PREDICTING ADAPTATION FROM GENOME SEQUENCES AND SYSTEMS INFORMATION

I have discussed above how we can use genome-wide association mapping to identify sequence variants responsible for differences in adaptive traits without any prior knowledge about the responsible genes. Fortunately, however, we do not operate in a vacuum and can also go in the other direction by using sequence information directly to predict the performance of the plant. Scientists from all over the world are discovering the genetic networks that control every imaginable trait in unprecedented detail, from leaf growth, flowering and root development to pathogen resistance and drought tolerance. A unifying goal of many colleagues is to transform biology from a largely descriptive discipline to a predictive science based on an understanding of the entire system. The long-term goal of systems-oriented biology is to derive computational models that include the myriads of dynamic interactions between molecules and cells in an organism and that also take into account the external factors such as light, temperature, water availability and so on.

Such models will enable us to simulate the effects of a change in either the regulatory networks or the environment on the phenotypes of individuals. We can then ask how changes in individual network components, as deduced from the DNA sequence, affect the ability of different strains of *Arabidopsis thaliana* to adapt to divergent environmental conditions. Among the sequence polymorphisms that we have already identified are thousands that drastically affect the integrity of genes, and such variants are obviously prime candidates for affecting adaptive traits. As our understanding of genes and their products become more sophisticated, we will be able

to predict also the effects of more subtle alterations, such as changes in specific amino acids of proteins. Our ultimate goal is to extend these approaches to any plant that is agronomically important or that plays a key role in an ecosystem. After surveying the genetic variation available in the entire species, we first want to reconstruct the actual genetic networks existing in each of the analyzed individuals. Based on this information, we wish to predict how a strain with a particular genetic makeup will perform under a variety of environmental scenarios. In addition, we can explore potential genetic networks that result from novel combinations of sequence variants generated from crosses between different parents.

Of particular interest are combinations that support survival under conditions that the species is currently not yet encountering, which would provide important guidance to plant breeders. While predicting the behavior of biological systems is admittedly a daunting challenge, the dizzying progress made by biologists in the past few decades gives me hope that this dream will become a reality in the next ten to twenty years.



A UNIFYING GOAL OF MANY COLLEAGUES IS TO TRANSFORM BIOLOGY FROM A LARGELY DESCRIPTIVE DISCIPLINE TO A PREDICTIVE SCIENCE BASED ON AN UNDERSTANDING OF THE ENTIRE SYSTEM.

ÜBER DIE AUTOREN | ABOUT THE AUTHORS

JENS BECKERT

(*1967) ist Direktor am Kölner MPI für Gesellschaftsforschung. Beckert studierte Soziologie und Betriebswirtschaftslehre an der Freien Universität Berlin und an der New School for Social Research in New York. Nach Magisterabschluss in Soziologie und dem Diplom-Kaufmann promovierte (1996) und habilitierte (2003) er sich im Fach Soziologie in Berlin. Von 2003 bis 2005 war er Professor für Gesellschaftstheorie an der Universität Göttingen, seit 2005 ist er Direktor und Wissenschaftliches Mitglied am MPI für Gesellschaftsforschung. Beckerts Forschungsgebiete sind vor allem die soziale Einbettung der Wirtschaft und die Soziologie des Marktes.

(*1967) is Director at the MPI for the Study of Societies in Cologne. Beckert studied sociology and business administration at the Free University Berlin and the New School for Social Research in New York. Having graduated with a Master's degree in sociology and degree (Diplom) in business administration, he completed both his doctorate (1996) and German post-doctoral lecturing qualification (Habilitation) (2003) in Berlin. He was Professor of Social Theory at the University of Göttingen from 2003 to 2005 and has been Director and Scientific member at the MPI for the Study of Societies since 2005. Beckert's research is primarily focused on the role of the economy in society and the sociology of markets.

GÜNTHER HASINGER

(*1954) ist seit Ende 2008 Wissenschaftlicher Direktor des MPI für Plasmaphysik. Hasinger studierte Physik in München und promovierte 1983 am MPI für extraterrestrische Physik, wo er anschließend wissenschaftlicher Angestellter wurde. 1995 habilitierte er sich an der LMU München. Von 1994 bis 1998 war er Professor an der Universität Potsdam und parallel Direktor und Wissenschaftlicher Vorstand des Astrophysikalischen Instituts Potsdam. Seit 2001 war Hasinger Direktor am MPI für extraterrestrische Physik, wo die Röntgenastronomie sein Hauptforschungsgebiet war. Hasinger war von 2004 bis 2006 Vorsitzender des Rates Deutscher Sternwarten. Im Jahr 2005 erhielt er den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Fotograf: Felix Brandl

(*1954) has been Scientific Director of the MPI for Plasma Physics since the end of 2008. Hasinger studied physics in Munich and completed his doctorate at the MPI for Extraterrestrial Physics in 1983, where he subsequently worked as a research scientist. He did his German Habilitation in Munich in 1995. He held a professorship at the University of Potsdam from 1994 to 1998 and was also Director and Speaker of the Scientific Board of the Astrophysikalisches Institut Potsdam (AIP). Hasinger was Director at the MPI for Extraterrestrial Physics from 2001 where the main focus of his research was X-ray astronomy. He was awarded the Leibniz Prize of the German Research Foundation (DFG) in 2005.
Fotograf: Felix Brandl

DETLEF WEIGEL

(*1961) studierte Biologie in Bielefeld und Köln und promovierte 1988 in Tübingen, wo er bei Herbert Jäckle am MPI für Entwicklungsbiologie geforscht hatte. Danach war er für mehrere Jahre Postdoktorand am California Institute of Technology in Pasadena und anschließend von 1993-2002 Assistant und Associate Professor am Salk Institute in La Jolla / Kalifornien. Seit 2001 ist er Direktor am MPI für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Weigel erhielt für seine Arbeiten zur Pflanzengenetik und zur vergleichenden Genomforschung zahlreiche Preise, so unter anderem im Jahr 2007 den Leibniz-Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft und im Jahr 2010 den Otto Bayer Preis. Weigel ist Mitglied der Academia Europaea und der Leopoldina.

(*1961) studied biology in Bielefeld and Cologne and completed his doctorate in Tübingen in 1988, where he carried out research with Herbert Jäckle at the MPI for Developmental Biology. This was followed by several years of post-doctoral work at the California Institute of Technology in Pasadena and as Assistant and Associate Professor at the Salk Institute. He has been Director at the MPI for Developmental Biology in Tübingen since 2001. Weigel has received numerous awards for his research including, for example, the Leibniz Prize of the German Research Foundation (DFG) in 2007 and the Otto Bayer Prize in 2010. Weigel is a member of the Academia Europaea and the Leopoldina.