



© MPI für Neurobiologie

PROF. DR. TOBIAS BONHOEFFER
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR NEUROBIOLOGIE, MARTINSRIED

Die Welt im Kopf

Leben basiert in vielerlei Hinsicht auf Erinnerungen an Vergangenes. Genetisches, neuronales und kulturelles Gedächtnis formen Spezies, Individuen oder auch Kulturen. Das elementarste und allen Lebensformen eigene Gedächtnis ist hierbei das genetische. Die Bildung des genetischen Gedächtnisses nimmt viele Generationen in Anspruch: So entstehen im Laufe der Evolution zahlreiche Anpassungen, die nicht nur am Körperbau eines Tieres, sondern auch in der allgemeinen Struktur und den biochemischen Vorgängen seines Nervensystems zu finden sind. Viele Eigenschaften des Gehirns, wie zum Beispiel der Schlaf-Wach-Rhythmus, die Steuerung der Nahrungsaufnahme und die grundlegenden Prozesse der sensorischen Verarbeitung, sind aufgrund dieses genetischen Gedächtnisses bereits zum Zeitpunkt der Geburt ausgebildet.

Um innerhalb einer sich wandelnden Umwelt besser zu überleben, haben Tiere aber auch die Fähigkeit entwickelt, Verhaltensweisen im Laufe ihres Lebens zu ändern, und zwar auf Grund von individuellen Erfahrungen. Lernen und Gedächtnis ermöglichen es Organismen mit Gehirn, auf Veränderungen der Umwelt in Zeiträumen von Tagen, Stunden, manchmal sogar Minuten zu reagieren. Vor allem aus diesem Grund bedeutet das Gehirn für einen Organismus einen großen evolutionsbiologischen Vorteil, und die Fähigkeit zu Lernen kann sicher als eine der wichtigsten Eigenschaften des Gehirns angesehen werden.

Das Potenzial, etwas zu lernen und im Gedächtnis zu speichern, ist nicht gleichmäßig über das Tierreich verteilt. Bei Menschen beispielsweise sind Effektivität und Kapazität des Gedächtnisses besonders stark ausgeprägt. Unsere entsprechenden Fähigkeiten sind neben der Sprache eine wichtige Grundlage unserer Kultur. Lernen und Gedächtnis nicht verstanden zu haben, hieße deshalb auch, etwas Elementares unseres Menschseins nicht zu verstehen.

Wie wichtig das Gedächtnis für uns ist, zeigt sich vielleicht am eindrücklichsten beim Kontakt mit Patienten, deren Erinnerungsvermögen gestört ist, etwa durch die Alzheimersche Krankheit oder durch den Ausfall des Hippocampus, einer Hirnregion, die eine zentrale Rolle für Lernen und Gedächtnis spielt. Menschen, die sich nicht mehr erinnern können, haben größte Schwierigkeiten, sich im täglichen Leben zurechtzufinden. Sie vergessen Namen und Fakten, sie erkennen ihre engsten Verwandten nicht mehr und sie finden den Weg nach Hause nicht mehr. Oft können diese Patienten ihren Alltag nur mit intensiver Hilfe anderer Menschen meistern.

DAS RÄTSEL

Seit über 100 Jahren wird von Neurobiologen darüber spekuliert, wie Informationen im Gehirn niedergelegt sein könnten

und wie es das Gehirn schafft, einen schnellen Zugriff auf Daten aus diesem riesigen Informationsspeicher zu ermöglichen. Der berühmte spanische Neuroanatom Ramón y Cajal (1852-1934) war einer der ersten, der erkannte, dass Veränderungen, die mit der Speicherung von Informationen im Gehirn einhergehen müssen, mit großer Wahrscheinlichkeit an den Verbindungsstellen zwischen Nervenzellen, den sogenannten Synapsen, stattfinden. In einer Zeit, in der die technischen Möglichkeiten im Vergleich zu heute sehr beschränkt waren, setzte er Maßstäbe nicht nur durch eine beispiellose Detailbesessenheit bei der Anfertigung von Färbungen des Gehirns und deren akribischer Dokumentation durch Tuschezeichnungen, sondern auch durch eine unerreichte Beobachtungs- und Kombinationsgabe. Diese versetzte ihn in die Lage, aus seinen verhältnismäßig einfachen Daten weitreichende Schlüsse zu ziehen, die in vielen Fällen bis heute Bestand haben. So auch die Hypothese, dass das Gehirn Information in Synapsen speichert.

**KANN MAN DIESE VERÄNDERUNGEN SICHTBAR
MACHEN UND SO DEM GEHIRN BEIM LERNEN
RICHTIGGEHEND ZUSEHEN? WIR WISSEN JETZT:
MAN KANN!**

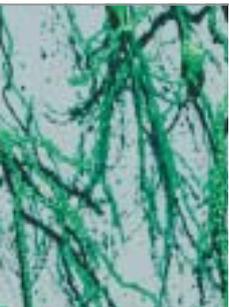


Der kanadische Psychologe Donald Hebb formulierte 50 Jahre später in seinem Buch *The Organization of Behavior* eine Präzisierung von Cajals Ideen. Hebb schlug vor, dass sich Synapsen so verändern, dass gleichzeitig aktive Nervenzellen ihre Verbindungen verstärken, während Nervenzellen, die nie oder selten gleichzeitig aktiv sind, ihre Synapsen abschwächen. Doch auch dies waren – wie Ramón y Cajals frühe Ideen – Hypothesen, und es dauerte weitere 40 Jahre bis schwedische Wissenschaftler zeigen konnten, dass Synapsen im Säugerhirn tatsächlich dieser „Hebbschen Regel“ gehorchen. Diese Experimente demonstrierten zum ersten Mal, wie die komplexe Fähigkeit des Lernens auf einen relativ einfachen zellulären Mechanismus zurückgeführt werden kann.

Trotz dieses bemerkenswerten Erfolges blieben wichtige Fragen, vielleicht sogar die wichtigste Frage, offen. Was genau verändert sich im Gehirn und an seinen Synapsen, wenn Informationen gespeichert werden? Wird eine bereits bestehende synaptische Verbindung durch den Lernvorgang effektiver oder wird sie anatomisch verändert oder werden gar neue Verbindungen geknüpft? Und kann man diese Veränderungen sichtbar machen und so dem Gehirn beim Lernen richtiggehend zusehen? Wir wissen jetzt: Man kann!

DIE INNOVATION

Synapsen, die Kontaktstellen zwischen Nervenzellen, befinden sich größtenteils auf mikroskopisch kleinen Fortsätzen der Zellen, den sogenannten dendritischen Dornen. Die etwa ein tausendstel Millimeter langen dendritischen Dornen können in entsprechend aufbereitetem und dem Gehirn entnommenem Gewebe relativ leicht mit einem hochauflösenden Lichtmikroskop – besser noch mit einem Elektronenmikroskop – sichtbar gemacht werden. Wenn man jedoch dem Gehirn beim Lernen zuschauen möchte, muss man lebende Nervenzellen betrachten: Und weder ein Elektronenmikroskop noch ein konventionelles Lichtmikroskop bei der nötigen starken Vergrößerung sind dafür geeignet.



SYNAPSEN UND DORNEN SIND DIE SPEICHEREINHEIT – SOZUSAGEN DAS BIT DES GEHIRNS. VERÄNDERUNGEN AN IHNEN KÖNNEN NICHT NUR ABSTRAKT GEMESSEN, SONDERN MIT EINEM MIKROSKOP BEOBACHTET WERDEN.

Winfried Denk (Max-Planck-Institut für medizinische Forschung, Heidelberg) und Watt Webb (Cornell Universität, Ithaca, New York) hatten die bahnbrechende Idee, das physikalische Prinzip der Zwei-Photonen-Anregung – schon 1930 von der deutschen Physikerin Maria Goeppert-Meyer beschrieben – zu nutzen, um ein genial einfaches, aber extrem leistungsfähiges Mikroskop zu konstruieren. Mit diesem sogenannten Zwei-Photonen Mikroskop können durch die Kombination eines einfachen physikalischen Prinzips mit moderner Lasertechnik selbst tief in lebendem Gewebe Strukturen im Mikrometerbereich sichtbar gemacht werden. Dieses Instrument revolutioniert derzeit die gesamte Biologie und ermöglicht beispielsweise Neurobiologen erstmals in das lebende Gehirn buchstäblich „hineinzuschauen“ und zu beobachten, wie sich Nervenschaltkreise unter dem Einfluss von Erfahrung und beim Lernen verändern.

Nach Jahrzehnten wenig erfolgreicher Anstrengungen vieler Wissenschaftler, Hinweise für solche Veränderungen zu finden, ermöglichte es uns diese neue Technik im Jahr 1999 erstmals zu zeigen, dass die von Hebb postulierte Verstärkung von Synapsen bei Lernvorgängen tatsächlich mit kleinsten anatomischen Veränderungen auf der Ebene der dendritischen Dornen einhergeht. Wenn Synapsen verstärkt und damit Information gespeichert wurde, wuchsen unter dem Mikroskop neue dendritische Dornen. Wenn Synapsen dagegen abgeschwächt

wurden, verschwanden einige dieser Dornen. Zum ersten Mal konnte damit „live“ beobachtet werden, wie das Gehirn beim Lernen seine Verschaltung ändert, und es zeigte sich, dass die Neubildung und der Abbau von synaptischen Verbindungen zwischen Nervenzellen eng mit der Speicherung von Informationen bzw. dem Vergessen verbunden sind.

Der erstmalige Nachweis, dass Synapsen und Dornen die Speichereinheit – sozusagen das Bit des Gehirns – sind, und dass Veränderungen an ihnen nicht nur abstrakt gemessen, sondern mit einem Mikroskop beobachtet werden können, war ein großer Schritt vorwärts (und wurde vom Wissenschaftsmagazin *SCIENCE* 1999 zum *Breakthrough of the Year* in den Neurowissenschaften gekürt). Dennoch, all diese Experimente fanden nicht am intakten Gehirn, sondern an isoliertem Gehirngewebe *in vitro* (das heißt in Zellkultur) statt. Sie geben deshalb zwar Auskunft darüber, wie einzelne, dem Lernen zugrundeliegende Prozesse ablaufen, sie können aber nie endgültig klären, ob sich im intakten Gehirn (*in vivo*) ähnliche Vorgänge abspielen wie in der Kulturschale. Natürlich ist es aber das große Ziel zu verstehen, wie im komplexen Zusammenspiel von zig Milliarden Nervenzellen das intakte Gehirn funktioniert. Deshalb ist es notwendig, Verhaltens- und Lernparadigmen zu entwickeln, mit deren Hilfe essenzielle Lernphänomene auf der Ebene einzelner Nervenzellen und ihrer Verbindungen untersucht werden können. Gleichzeitig müssen Techniken wie die Zwei-Photonen-Mikroskopie so verfeinert werden, dass sie auch im intakten Organismus angewandt werden können, um dort die auf zellulärer Ebene stattfindenden Veränderungen sichtbar zu machen.

DAS PHÄNOMEN

„Was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr“ – wir alle kennen das Phänomen, dass Kinder vieles leichter lernen als Erwachsene. Wir wissen auch, dass einmal im Kindesalter gelernte Fähigkeiten, selbst wenn sie lange im Verborgenen schlummern, im Erwachsenenalter leicht wieder „hervorgeholt“ werden können. Wer einmal als Kind Skifahren gelernt hat, wird es auch nach 30-jähriger Unterbrechung schnell wieder beherrschen, während es für Erwachsene – ohne die vorausgegangene Erfahrung im Kindesalter – oft sehr mühsam ist, Skifahren zu lernen.

Gibt es dieses Phänomen auch bei Tieren? Und kann man die oben beschriebenen Methoden so einsetzen, dass im intakten Gehirn untersucht werden kann, welche morphologischen Veränderungen beim frühen Lernen stattfinden und welche beim späten Lernen? Werden vielleicht die beim frühen Lernen angelegten Nervenzellverbindungen beim (Wieder-) Erlernen einer Fähigkeit im adulten Tier reaktiviert? Oder wird „von vorne“, aber dennoch schneller und effektiver gelernt?

Mäuse, wie auch andere Säugetiere und Menschen, zeigen in ihrem Sehkortex, d.h. in dem Teil der Großhirnrinde, in dem visuelle Information verarbeitet wird, einen Lernvorgang, der als okuläre Dominanzplastizität bezeichnet wird: Sieht ein Auge nicht mehr scharf, etwa weil die Linse durch einen Katarakt getrübt ist, so werden die Verschaltungen des Gehirns so umorganisiert, dass nur noch sehr wenige Nervenzellen vom schlecht sehenden Auge innerviert werden, während ein Großteil der Nervenzellen im Sehkortex Signale vom anderen, gesunden Auge erhält. Dieser Effekt kann rückgängig gemacht werden, wenn die Ursache der visuellen Störung behoben, beispielsweise der Katarakt beseitigt wird.

Es war eine wichtige Erkenntnis der Nobelpreisträger Torsten Wiesel und David Hubel in den 1960er-Jahren, dass die okuläre Dominanzplastizität, wie auch viele andere Formen des Lernens in der frühen Kindheit, in der so genannten kritischen Phase sehr stark ausgeprägt sind, während das adulte Nervensystem weit weniger plastisch ist („was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr“). In Anlehnung an die oben beschriebenen Beispiele menschlicher Erfahrung lag es nahe zu testen, ob ein früherer Augenverschluss und die entsprechende Reorganisation im Sehkortex auch dazu führt, dass im adulten Gehirn – in diesem Fall von Mäusen – eine solche wiederkehrende Erfahrung schneller und leichter umgesetzt werden kann. Tatsächlich zeigt sich, dass dies der Fall ist. Auch bei Mäusen bewirkt frühe Erfahrung ein leichteres und besseres Lernen im adulten Nervensystem.

Der große Vorteil, dieses Phänomen auch in Mäusen gefunden zu haben, besteht darin, dass es genetisch veränderte Mäuse gibt, deren Nervenzellen fluoreszieren, und dass diese mit dem Zwei-Photonen-Mikroskop im intakten Tier beobachtet werden können. Unsere bisherigen Untersuchungen zeigen, dass ein früherer Augenverschluss in der Tat auch zu Änderungen der oben beschriebenen Dornen im Sehkortex von Mäusen führt. Auch hier hinterlässt also ein Lernvorgang eine anatomische sichtbare Spur im Gehirn. Aber bleiben diese Veränderungen auch nach dem Wiederöffnen des verschlossenen Auges bestehen? Und könnten sie Grundlage für das schnellere Lernen bei der erwachsenen Maus sein? Die Antwort auf diese Frage wissen wir nicht – noch nicht, denn die Experimente dazu haben schon begonnen.

DIE HERAUSFORDERUNG

Das Mysterium des menschlichen Gedächtnisses wurde vom Wissenschaftsmagazin *SCIENCE* in seiner Jubiläumsausgabe zum 125-jährigen Bestehen als eine der 25 größten Herausforderungen der modernen Wissenschaft gesehen. Das Gedächtnis ist zentral für unser Selbstverständnis, denn es bestimmt

entscheidend, wer wir sind. Natürlich sind viele Eigenschaften und Fähigkeiten angeboren, aber dennoch machen die über die Zeit angesammelten Erfahrungen und Erinnerungen einen Gutteil unserer Persönlichkeit aus. Deshalb bedeutet der Verlust des Gedächtnisses auch einen Verlust der eigenen Identität, und nicht zuletzt deshalb sind Krankheiten, wie Alzheimer, Gedächtnisverlust durch Hirnschlag oder andere neurologische Erkrankungen, Schicksalsschläge, die uns tief in unserem Inneren treffen. Aber nicht nur beim Erwachsenen, sondern auch am Anfang des Lebens gibt es Fehlentwicklungen des Nervensystems, die zu Lernstörungen führen, welche die ganze Persönlichkeit fundamental beeinflussen können. Ganz abgesehen von den persönlichen Schicksalen haben diese Entwicklungsstörungen und Krankheiten auch für die Gesellschaft enorme soziale und wirtschaftliche Konsequenzen.

Um krankhafte Veränderungen des Nervensystems, die zum Verlust des Gedächtnisses führen, verstehen und heilen zu können, ist es notwendig, zunächst zu begreifen, wie das intakte Gedächtnis funktioniert. Neue Methoden, wie oben beschrieben, geben uns seit wenigen Jahren Werkzeuge an die Hand, die es ermöglichen, dieses Wunderwerk mit erstaunlicher Genauigkeit zu untersuchen und Veränderungen im Gehirn bis hin zu subzellulären Strukturen von einem tausendstel Millimeter zu beobachten. Es ist heute möglich mit Hilfe der Zwei-Photonen-Mikroskopie das lebende Gehirn „bei der Arbeit“ zu beobachten, also buchstäblich dabei zuzuschauen, wie sich die

DAS GEDÄCHTNIS IST ZENTRAL FÜR UNSER SELBSTVERSTÄNDNIS, DENN ES BESTIMMT ENTSCHEIDEND, WER WIR SIND. [...] DESHALB BEDEUTET DER VERLUST DES GEDÄCHTNISSES AUCH EINEN VERLUST DER EIGENEN IDENTITÄT.



Schaltkreise des Gehirns an die Umwelt anpassen und wie damit Informationen im Gehirn gespeichert werden. Es ist in hohem Maße faszinierend und war bis vor wenigen Jahren undenkbar, dass Funktion und Struktur des Gehirns und deren Veränderung mit dieser Präzision im lebenden Organismus beobachtet werden können. Wichtige Aspekte wie die Tatsache, dass Lernen in der Kindheit späteres Lernen im Erwachsenenalter vereinfacht, können so im Tiermodell nachgebildet werden, und es kann untersucht werden, wie die Verschaltung von Nervenzellen diese Fähigkeit reflektiert.

All diese Untersuchungen sind momentan noch auf Tiermodelle begrenzt, denn die Untersuchungsmethoden beim Menschen beschränken sich derzeit auf Techniken wie die Kernspintomo-

grafie (MRI, MRT). Diese kann jedoch nur Strukturen auflösen, die etwa 1000-mal größer sind als die, die mit der Zwei-Photonen-Mikroskopie sichtbar gemacht werden können. Es ist im Moment noch schwer vorstellbar, dass es eines Tages möglich sein könnte, auch das lebende menschliche Gehirn mit vergleichbarer Präzision zu untersuchen und auch hier Veränderungen einzelner Nervenzellkontakte beim Lernen oder anderen kognitiven Leistungen zu beobachten. Aber nicht selten wird das scheinbar Unmögliche in kurzer Zeit Wirklichkeit. Die Auflösungsgrenze der Lichtmikroskopie beispielsweise schien bis vor kurzem durch die Abbesche Formel physikalisch unverrückbar festgelegt. Dennoch ist es in den vergangenen Jahren durch raffinierte optische Tricks gelungen, mit dem Lichtmikroskop Strukturen sichtbar zu machen, die eigentlich unsichtbar sein sollten, da sie etwa zehnmal kleiner sind als die nach Abbe berechnete Grenze des Sichtbaren. So wird durch Einfallsreichtum, gepaart mit wissenschaftlicher Chuzpe, selbst das physikalisch scheinbar nicht „Erlaubte“ plötzlich machbar, zum großen Vorteil für die Biologie und andere Naturwissenschaften. Es ist das Wesen guter Grundlagenforschung, dass keine auch noch so unverrückbar scheinende Grenze als unüberwindbar angenommen wird.

DIE ZUKUNFT

Die Darstellung einzelner Nervenzellen und ihrer Veränderung im menschlichen Gehirn würde es zum ersten Mal ermöglichen, Lernen und Gedächtnis sowie andere kognitive Fähigkeiten auch mit dem subjektiven menschlichen Erleben zu verknüpfen. Die Fortschritte in den letzten Jahren haben es ermöglicht, viele Experimente, die früher nur in Zellkulturen möglich waren, nun im intakten, lebenden Organismus durchzuführen. Dennoch bleibt die Beschränkung, dass das subjektive Erleben der Versuchsobjekte immer im Verborgenen bleibt. Warum hat man in einer bestimmten Situation falsch reagiert? Hat man „ein Bild vor Augen“, wenn man sich an eine Sache erinnert? Solche Fragen können wir nur Menschen, nicht aber Mäusen oder anderen Versuchstieren stellen. Antworten auf diese Fragen wären aber für das Verständnis von Gehirnprozessen äußerst wertvoll.

Wäre es außerdem – am anderen Ende des Spektrums – möglich, nicht nur einzelne Zellen zu beobachten, sondern auch die Vorgänge innerhalb dieser Zellen sichtbar zu machen, dann verstünde man sofort besser, was bei mit dem Lernen einhergehenden Prozessen, wie der Verstärkung von Synapsen und dem Ausbilden neuer dendritischer Dornen, geschieht. Könnte man beispielsweise beobachten, wie bei der Speicherung von Informationen einzelne Moleküle in die Nervenzellwand eingebaut und aus ihr entfernt werden, dann brächte dies unserer Verständnis von Lernvorgängen im Gehirn gewaltig voran.

Doch auch heute ist schon vieles erreicht. Gerade in den vergangenen zehn Jahren hat es eine ungeheure Entwicklung der technischen Möglichkeiten gegeben, ganz besonders bei den bildgebenden Verfahren. Hätte vor zehn Jahren jemand behauptet, man könne im Jahr 2007 nicht nur die Aktivität von mehreren tausend Nervenzellen gleichzeitig, sondern auch noch ihre Anordnung, Struktur und Verknüpfung aufzeichnen und in einer Maus über mehrere Wochen beobachten, hätte jemand behauptet, man könne die Bewegung einzelner Moleküle innerhalb von Nervenzellen im intakten Organismus studieren, so wäre diese Person wohl nicht sehr ernst genommen worden. Heute sind solche Experimente möglich, und sie helfen uns täglich besser zu verstehen, wie das Gehirn funktioniert.

Dennoch, bei allem technischen Fortschritt darf nicht vergessen werden, dass am Ende Einsicht und Vorstellungskraft der Wissenschaftler darüber bestimmen, wie weit wir das Gehirn und wie weit wir die Natur insgesamt verstehen werden. Die großen naturwissenschaftlichen Einsichten verdanken wir Forschern, die mit Vorstellungskraft und Fantasie die Gesetze der Natur erkannt und in Worte gefasst haben. Der eingangs erwähnte Ramón y Cajal war einer von ihnen. Niemand hat je schöner, poetischer und eindrucklicher die Faszination beschrieben, das Gehirn zu beobachten und zu sehen, wie neue Verbindungen zwischen Nervenzellen entstehen und vergehen, und damit die Basis für ein sich sekundlich an die Umwelt anpassendes Nervensystem bilden.

„I noticed that every outgrowth, dendritic or axonic, in the course of formation, passes through a chaotic period, so to speak, a period of trials, during which there are sent out at random experimental conductors most of which are destined to disappear.... What mysterious forces precede the appearance of the processes, promote their growth and branching (...) and finally establish those protoplasmic kisses, the intercellular articulations, which seem to constitute the final ecstasy of an epic love story?“ [S. Ramón y Cajal, „Recollections of my life“]



ES IST DAS WESEN GUTER GRUNDLAGENFORSCHUNG, DASS KEINE AUCH NOCH SO UNVERRÜCKBAR SCHEINENDE GRENZE ALS UNÜBERWINDBAR ANGENOMMEN WIRD.

PROF. DR. TOBIAS BONHOEFFER
MAX PLANCK INSTITUTE OF NEUROBIOLOGY, MARTINSRIED

The World in Our Heads

In many respects, life is based on recollections of the past. Genetic, neural and cultural memory shape species, individuals and even cultures. Genetic memory, the most basic form, is common to all kinds of life. It develops over many generations: for example, during the course of evolution, numerous adaptations occur that are reflected not only in an animal's anatomical structure, but also in the general structure and biochemical processes of its nervous system. It is because of this genetic memory that many properties of the brain, such as the sleep-wake cycle, the regulation of food intake and the basic sensory processes, are already present at the time of birth.

To survive better in an ever-changing environment, animals have also developed the ability to alter their pattern of behavior during their life on the basis of individual experience. Learning and memory enable organisms with a brain to respond to changes in their environment within days, hours, or sometimes even minutes. This is one of the reasons why having a brain is a great evolutionary advantage for an organism, and the ability to learn can certainly be considered one of the most important properties of the brain.

The ability to learn and memorize something is not distributed evenly throughout the animal kingdom. In humans, for example, the effectiveness and capacity of memory are particularly pronounced. The ability to memorize and remember is, together with language, one of the cornerstones of our culture. Therefore, failing to understand learning and memory would mean to fail grasping a fundamental aspect of human existence.

Just how important memory is for us is perhaps most evident when dealing with patients suffering from memory loss, for instance as a result of Alzheimer's disease or of damage to the hippocampus, a brain region that plays a key role in learning and memory. People who can no longer remember have great difficulties coping with everyday situations. They forget names and facts, no longer recognize their closest family members and cannot find their way home any more. In many cases, these patients can manage their day-to-day lives only with extensive assistance from others.

THE MYSTERY

Neurobiologists have been speculating for more than 100 years as to how information is stored in the brain and how the brain manages to access data from this huge store of information so quickly and effortlessly. The Spanish neuroanatomist Ramón y

Cajal (1852-1934) was one of the first to recognize that changes accompanying the storage of information in the brain probably take place at the junctions between neurons – the so-called synapses. At a time when technology was considerably less advanced than it is today, he set new standards, not only by his unparalleled attention to detail in preparing brain stains and his meticulous documentation through ink drawings, but also by his unrivaled powers of observation and combination. This enabled him to draw far-reaching conclusions from his relatively simple data – many of which are still valid today, including the hypothesis that the brain stores information in synapses.

Fifty years later, the Canadian psychologist Donald Hebb took Cajal's ideas a step further in his book *The Organization of Behavior*. Hebb suggested that synapses change in such a way that simultaneously active neurons strengthen their connections, while neurons that are rarely or never simultaneously active weaken their synapses. However, just like Ramón y Cajal's early ideas, these were hypotheses, and another 40 years were to pass before Swedish scientists succeeded in actually showing that synapses in the mammalian brain really do obey this "Hebbian rule." These experiments were the first to conclusively show how the complex ability to learn can be traced back to a relatively simple cellular mechanism.

CAN THESE CHANGES BE MADE VISIBLE SO THAT WE CAN ACTUALLY WATCH THE BRAIN AS IT LEARNS? WE NOW KNOW THE ANSWER: THEY CAN!



Despite this remarkable success, important questions – indeed perhaps the most important question of all – remained unanswered. What exactly is it that changes in the brain and at its synapses, when information is stored? Does an existing synaptic connection become more effective as a result of the learning process, or is it anatomically altered? Or are, perhaps, entirely new connections created? And if so, can these changes be made visible so that we can actually watch the brain as it learns? We now know the answer: they can.

THE INNOVATION

Synapses, the points of contact between neurons, are usually located on minute protrusions from nerve cells, known as dendritic spines. Approximately one-thousandth of a millimeter in length, dendritic spines in fixed, i.e. dead tissue, can be seen quite easily with a high-resolution optical microscope – and better still with an electron microscope. However, if one wants to watch the brain learn, one has to study living neurons, and neither an electron microscope nor a conventional optical microscope at the required magnification is suitable for this.

Winfried Denk (Max Planck Institute for Medical Research, Heidelberg) and Watt Webb (Cornell University, Ithaca, New York) had the seminal idea of using the physical principle of two-photon excitation – described as early as 1930 by the German physicist Maria Goeppert-Meyer – to construct an ingeniously simple but incredibly powerful microscope. By combining a simple physical principle with modern laser technology, this instrument, known as a two-photon microscope, can be used to reveal structures in the micrometer range even if they are buried deep within living tissue. This microscope is currently revolutionizing the entire field of biology, enabling neurobiologists to literally take a peek into the living brain to observe neural connections as they change under the influence of experience and during learning.

first time, it was possible to watch “live” how the brain changes its circuitry when learning, and the new formation and the breakdown of synaptic connections between neurons were seen to be closely linked to the storage or loss of information.

This first evidence that synapses and spines are the smallest basic storage unit – the ‘Bit’ of the brain, as it were – and that changes in them can not only be measured indirectly, but can also be observed with a microscope, was a great step forward (and was also selected the “Breakthrough of the Year” in the neurosciences in 1999 by the journal *SCIENCE*). However, none of these experiments were performed in an intact brain, but in isolated brain tissue *in vitro* (i.e. in cell culture). Thus, although they provide information on how individual learning processes develop, such experiments can never fully clarify whether similar processes occur in the intact brain (*in vivo*). But since the ultimate goal is, of course, to understand how the intact brain functions by the complex interaction of billions of neurons, behavioral and learning paradigms have to be developed with which essential learning phenomena can be investigated at the level of individual neurons and their connections. At the same time, technologies such as two-photon microscopy must be further refined so that we can use them to examine the changes occurring at the cellular level in intact organisms.



SYNAPSES AND SPINES ARE THE SMALLEST BASIC STORAGE UNIT – THE ‘BIT’ OF THE BRAIN. CHANGES IN THEM CAN NOT ONLY BE MEASURED INDIRECTLY, BUT CAN ALSO BE OBSERVED WITH A MICROSCOPE.

In 1999, after decades of rather unsuccessful attempts on the part of many scientists, to provide evidence of such changes, this new technology suddenly enabled us to show for the first time that Hebb's postulated strengthening of synapses during learning processes is, in fact, accompanied by tiny anatomical changes at the level of the dendritic spines. When synapses were strengthened and information thus stored, new dendritic spines grew under the microscope. By contrast, when synapses were weakened, some of the spines disappeared. For the

THE PHENOMENON

“You can't teach an old dog new tricks” – we are all familiar with the phenomenon that it is much easier to learn certain things while still a child. We also know that abilities acquired as a child can easily be reactivated as an adult, even if they have gone unused for years. Anyone who has learned how to ski as a child will quickly master that skill again, even if they have not practiced for 30 years, while adults with no prior experience usually find it quite difficult to learn to ski.

Does a similar phenomenon occur in animals? And can the methods described above be applied in the intact brain to investigate which morphological changes occur during early and which during later (re-)learning? Are the neuronal connections established during early learning perhaps reactivated when the adult animal (re-)gains a skill? Or is this ability learned “from scratch,” but nonetheless more quickly and effectively than would otherwise be the case?

Mice, like other mammals and humans, display in the visual cortex – the part of the brain where visual information is processed – a learning process known as ocular dominance

plasticity. If an eye no longer sees clearly – e.g. because the lens is clouded by a cataract – the circuitry in the brain is reorganized such that only very few neurons are still innervated by the eye with poor vision, while the majority of the neurons receive signals from the other, healthy eye. This effect can be reversed if the cause of the visual disturbance is rectified promptly by removing the visual obstruction, in our case the cataract.

One important discovery of the 1960s, made by the Nobel laureates Torsten Wiesel and David Hubel, was that ocular dominance plasticity, like many other forms of learning, is very pronounced in early childhood – the so-called critical phase – while the adult nervous system is much less plastic (again: “you can’t teach an old dog new tricks”). Based on the examples of human experience described above, it seemed appropriate to test whether early occlusion of the eye and the corresponding reorganization in the visual cortex also results in such an experience being realized more quickly and easily in the adult brain – of the mouse in this instance. And indeed, this proved to be the case. Early experience also led to easier and more effective learning in the adult nervous system of the mouse.

The great advantage of having identified this phenomenon in mice is that some neurons in a certain strain of genetically altered mice fluoresce. These neurons are therefore visible in the intact animal with the two-photon microscope. Our studies show that early occlusion of one eye does indeed also cause changes in the spines in the visual cortex of mice. So here, too, a learning process leaves an anatomically visible mark in the brain. But do these changes continue to exist once the occluded eye opens again? And could they be the reason why in this case the adult mouse learns faster? We do not know the answer to this question – not yet, anyway, but the experiments addressing this issue are already under way.

THE CHALLENGE

In a special edition celebrating its 125-year anniversary, the journal SCIENCE called the mystery of human memory one of the 25 greatest challenges of modern science. Memory is crucial to our understanding of ourselves, since it plays a key role in defining who we are. Although, of course, many traits and abilities are hereditary, the experiences and memories we accumulate over time are also a vital component of our personality. That is why loss of memory also means the loss of our personal identity, which is yet another reason why disorders such as Alzheimer’s and memory loss due to stroke or other neurological diseases shake us to the core. However,

malfunctions of the nervous system that lead to learning disorders and affect the entire personality are not restricted to adulthood, but can also occur at early stages of life. And, quite apart from personal fates, these developmental disorders and diseases have enormous social and economic consequences for society.

Before being able to understand and cure pathological changes of the nervous system causing loss of memory, we first need to understand how the intact memory functions. In recent years, new methods such as those described above have given us the wherewithal to study this marvel with astounding precision. We can now discern changes in the brain right down to the level of sub-cellular structures no greater than a thousandth of a millimeter in size. Today, thanks to two-photon microscopy, we can observe the living brain “at work” – in other words, we can watch how the brain’s circuits adapt to the environment and how this results in information being stored in the brain. It is simply fantastic that the brain’s function and changes in its structure can now be studied with such precision in a living organism, something quite inconceivable up until a few years ago. It allows us to study important aspects, such as the fact that learning in childhood facilitates later learning in the animal model, and we can now look further into how neural interconnections reflect this ability.

MEMORY IS CRUCIAL TO OUR UNDERSTANDING OF OURSELVES, SINCE IT PLAYS A KEY ROLE IN DEFINING WHO WE ARE. [...] THAT IS WHY LOSS OF MEMORY ALSO MEANS THE LOSS OF OUR PERSONAL IDENTITY.



At present, all of these studies are limited to animal models, as the experimental methods for humans are currently restricted to techniques like magnetic resonance imaging (MRI, MRT). However, such techniques can only resolve structures some 1,000 times larger than those visible under a two-photon microscope. It is still difficult to imagine that one day it might be possible to study the living human brain with similar precision and to watch changes taking place in individual neural connections during learning or other cognitive tasks. But frequently something that seems impossible quickly becomes reality. For instance, until recently, the resolution limit of optical mi-

croscopy seemed to be physically and rigidly fixed once and for all by Abbe's equation. But in recent years, scientists have succeeded in using light microscopes and sophisticated optical tricks to view structures that really ought to be invisible, since they are about 10 times smaller than the limit calculated by Abbe. This can serve as an example how a good amount of creativity, coupled with some scientific chutzpa, suddenly makes things feasible that seem to be physically impossible, to the great advantage of biology and other natural sciences. It is the essence of good basic research that not even the most unyielding-seeming limit is taken to be insurmountable.

But we have come a long way as it is. The last ten years in particular have seen tremendous technological developments, above all in imaging methods. If someone had claimed ten years ago that by the year 2007 we would be able to record the activity and the arrangement, structure and connections of several thousand neurons simultaneously, and monitor them in a mouse over the course of several weeks, or if someone had claimed that we could study the movement of individual molecules within neurons in intact organisms, this person would most likely not have been taken very seriously. Today, such experiments are feasible, and help us to gain an ever clearer picture of how the brain works.



**IT IS THE ESSENCE OF GOOD BASIC RESEARCH
THAT NOT EVEN THE MOST UNYIELDING – SEEMING
LIMIT IS TAKEN TO BE INSURMOUNTABLE.**

THE FUTURE

Visualizing individual neurons and their changes in the human brain would make it possible – for the first time – to link learning and memory, as well as other cognitive abilities, with subjective human experience. The progress of recent years has enabled researchers to conduct many of their experiments, which were previously only possible in cell cultures, in intact, living organisms. Nonetheless, they are still limited by the fact that the subjective experience of non-human subjects always remains concealed. Why did a human or an animal make the wrong decision in a certain situation? Do we have a mental picture of something when we recall it? We can pose these questions only to humans, not to mice or other laboratory animals. But getting answers to these would take us a long way in our bid to understand more complex brain processes.

At the other end of the spectrum, if we were able not only to examine individual cells, but also to make the processes inside them visible, we would immediately understand better what happens in the processes that accompany learning, such as the strengthening of synapses and the formation of new dendritic spines. For example, if we could watch individual molecules being incorporated into and removed from the neuronal cell membrane when information is stored, it would greatly improve our understanding of learning processes in the brain.

And yet, in the midst of all the technological progress, we must not forget that, in the long run, it is scientists' insight and powers of imagination that will determine the extent to which we comprehend the brain, and nature as a whole. The great scientific insights achieved so far we owe to those researchers who used their imagination and fantasy to recognize the laws of nature and express them in words. The above-mentioned Ramón y Cajal was one of them. No one has ever described more beautifully, poetically and vividly the fascination of examining the brain and watching how new connections between neurons form and fade to form the basis of a nervous system that adapts anew, second for second, to the environment as it changes over time.

"I noticed that every outgrowth, dendritic or axonic, in the course of formation, passes through a chaotic period, so to speak, a period of trials, during which there are sent out at random experimental conductors most of which are destined to disappear... What mysterious forces precede the appearance of the process, promote their growth and branching (...) and finally establish those protoplasmic kisses, the intercellular articulation, which seems to constitute the final ecstasy of an epic love story?" [S. Ramón y Cajal, Recollections of My Life]



© Science Photo Library

PROF. DR.-ING. DIERK RAABE UND PROF. DR. JÖRG NEUGEBAUER
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG, DÜSSELDORF

Neue Wege in der Werkstoffentwicklung

GRUNDSÄTZLICHE FRAGESTELLUNG

Konstruktions- und Funktionswerkstoffe auf der Basis von Metallen, Keramiken oder Polymeren sind seit jeher vor allem durch empirische Verfahren neu- und weiterentwickelt worden. Neuentwicklungen und Verbesserungen solcher Werkstoffe resultieren dabei einerseits aus der Erfahrung, wie sich bestimmte Legierungszusätze auf Festigkeit, Härte oder Leitfähigkeit auswirken, und andererseits aus einigen einfachen thermodynamischen und kinetischen Zusammenhängen bezüglich Stabilität und Darstellbarkeit auf der Basis einfachster Modelllegierungen. In diesem Zusammenhang spielen verschiedene Methoden der Computersimulation seit 15 Jahren eine zunehmend wichtige Rolle, um einzelne Aspekte eines neuen Werkstoffs, wie etwa seine mechanischen Eigenschaften, gezielt vorherzusagen.

Am Max-Planck-Institut für Eisenforschung haben wir daher als Alternative zur Multiskalensimulation das Verfahren der Skalen überbrückenden Werkstoffsimulation entwickelt, um Vorhersagen von der atomaren Ebene bis hin zur Makroskala vornehmen zu können. Dabei werden, anders als bei der oben beschriebenen sukzessiven Weitergabe von Materialinformationen von Skala zu Skala, quantenmechanische Ergebnisse der Elektronentheorie unmittelbar auf der makroskopischen Ebene eingebunden, typischerweise ohne dabei mesoskopische Simulationen (auf der Skala von einem Nanometer bis zu einem Mikrometer) berücksichtigen zu müssen. Wir berechnen Eigenschaften, wie beispielsweise die Elastizität, die ein makroskopisches Werkstück charakterisieren, also bereits auf der atomaren Ebene.



BEI DER ENTWICKLUNG VERBESSERTER IMPLANTATWERKSTOFFE HANDELT ES SICH NICHT NUR UM EINE BEDEUTENDE MEDIZINTECHNISCHE HERAUSFORDERUNG, SONDERN ES GEHT AUCH UM ENORME MÖGLICHKEITEN BEI DER ERSCHLIEßUNG NEUER MÄRKTE.

Auf den einzelnen Skalen – von der atomaren Ebene bis zum kompletten Werkstück – haben diese Methoden inzwischen ihre Vorhersagekraft bewiesen. Schwierig ist es bislang aber noch, die Eigenschaften eines Werkstoffs, etwa einer bestimmten Legierung, nur auf der Basis ihrer atomaren Komponenten zu berechnen. Zu diesem Zweck müssen Ergebnisse von Simulationen auf jeweils benachbarten Größen- und Ortsskalen ausgetauscht bzw. sinnvoll miteinander verknüpft werden. Bislang wurden bestimmte Aspekte bei der Werkstoffprognose zwischen den unterschiedlichen Modellen und Skalen mit Hilfe von Multiskalenverfahren weitergegeben. Aufgrund der enormen Zeit- und Größenunterschiede zwischen der atomaren bzw. mikroskopischen und der makroskopischen Skala wird es aber auch in absehbarer Zukunft nicht möglich sein, einen Werkstoff komplett über alle aufeinanderfolgenden Skalen hinweg durchgehend theoretisch zu beschreiben. Das lässt sich an einem einfachen Beispiel veranschaulichen: So laufen elektronische An- und Abregung im Bereich von Picosekunden ab, wohingegen Prozesse der Korrosion oder der Materialermüdung in der Größenordnung von Jahren anzusiedeln sind. Bezüglich der Ortsskala bewegen sich die relevanten Größenordnungen vom Sub-Angströmbereich (kleiner als 10^{-10} Meter) bis hin zu hunderte von Metern großen Konstruktionen.

EIN NEUES BIOMATERIAL FÜR IMPLANTATE ALS BEISPIEL FÜR QUANTENMECHANISCH GEFÜHRTES WERKSTOFFDESIGN

Im Folgenden belegen wir den Erfolg der neuen Herangehensweise am Beispiel zweier am Max-Planck-Institut für Eisenforschung jüngst neuentwickelter Biowerkstoffe für Implantatanwendungen. Als Ausgangsbasis für die Materialentwicklung dient das typische Implantatmetall Titan. Es ist sehr bioverträglich, besitzt eine gute Verarbeitbarkeit sowie eine hohe Härte und ist daher heute ein Standardmaterial in der Medizintechnik. Allein im Hüftbereich werden jährlich weltweit mehr als eine Million Prothesen eingesetzt. Diese Zahl belegt, dass es sich bei der Entwicklung verbesserter Implantatwerkstoffe nicht nur um eine bedeutende medizintechnische Herausforderung handelt, sondern, dass es auch um enorme Möglichkeiten bei der Erschließung neuer Märkte geht.

Trotz seiner positiven Eigenschaften besteht beim Einsatz von Titan, wie auch vergleichbarer Ersatzwerkstoffe, ein bisher ungelöstes großes Problem: Während der menschliche Knochen eine elastische Steifigkeit von etwa 20 GPa besitzt, bewegen sich die entsprechenden elastischen Steifigkeiten der Titanimplantate im Bereich von 100 bis 110 GPa. Diese Diskrepanz im mechanischen Verhalten zwischen Knochen und angrenzender Prothese führt zum Effekt der mechanischen Abschirmung. Das bedeutet, dass die im betroffenen Körperteil übertragene Kraft nicht mehr vom Knochen, sondern überwiegend vom metallischen Implantat getragen wird. Da der Knochen seine innere Struktur und die daraus resultierende mechanische Leistungsfähigkeit aber in Abhängigkeit von der anliegenden mechanischen Spannungen verändert, führt seine künstliche Entlastung durch das Implantat im Laufe der Zeit zu seiner Schwächung. In der Folge kommt es zur Knochen-

schädigung und zur Lockerung des Implantats. Auch die Entstehung von Entzündungsherden an der Grenzfläche zwischen Knochen und Implantat ist in diesem Zusammenhang ein großes Problem. Die mechanische Schädigung sowie resultierende Entzündungen machen es in der Regel notwendig, dass die Prothese ausgetauscht werden muss.

Vor diesem Hintergrund haben wir uns die Aufgabe gestellt, mit Hilfe der Verknüpfung von Quantenmechanik und Kontinuumstheorie bei gleichzeitig strenger experimenteller Überprüfung der Vorhersagen neue Titan-basierte Legierungen herzustellen, die eine deutlich geringere Steifigkeit haben als bisherige Materialien und gleichzeitig über eine hervorragende Bioverträglichkeit, Festigkeit und Härte verfügen. Nur auf diesem Wege kann eine höhere mechanische Kompatibilität erreicht werden, die zu einer wesentlich verbesserten Langlebigkeit der Implantate im menschlichen Körper beitragen würde. Der Einsatz quantenmechanischer Rechnungen zeigte, dass Titan, welches in der Natur bei Raumtemperatur nur in einer hexagonalen Kristallstruktur vorkommt, in der kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur instabil gegenüber bestimmten Verzerrungen ist. Formal ausgedrückt weist Titan in dieser Kristallstruktur negative elastische Konstanten und damit eine verschwindende Steifigkeit auf. Diese Erkenntnis legte die Vermutung nahe, dass es durch Legierungsbildung möglich sein sollte, die Steifigkeit aufgrund dieser Instabilität des kubisch-raumzentrierten Titans deutlich zu reduzieren. Unser Entwicklungsansatz bestand daher darin, die kubisch-raumzentrierte Gitterstruktur, die beim reinen Titan nur bei hohen Temperaturen auftritt, durch eine geeignete Legierung auch bei Raumtemperatur zu stabilisieren.

Zu diesem Zweck haben wir uns Legierungen aus Titan und den hochschmelzenden kubisch-raumzentrierten Metallen Niob und Molybdän zugewandt, die medizinisch beide unbedenklich sind. Im ersten Schritt wurde dabei die Stabilität verschiedener Legierungen aus Titan und Niob sowie aus Titan und Molybdän mit *ab-initio*-Verfahren (i.e. Verfahren, die keine empirischen Parameter benötigen) untersucht. Angeleitet durch diese theoretischen Vorhersagen haben wir dann entsprechend aussichtsreiche Proben durch schmelzmetallurgische Verfahren hergestellt und am Elektronenmikroskop hinsichtlich der zuvor getroffenen *ab-initio*-Vorhersagen der auftretenden Strukturen überprüft. In der Tat belegen sowohl die quantenmechanischen Rechnungen als auch die Experimente an metallurgisch hergestellten Proben, dass mit zunehmendem Gehalt an Niob beziehungsweise Molybdän im Titan die kubisch-raumzentrierte Struktur des Materials bei Raumtemperatur eingestellt werden kann.

Der zweite wichtige Schritt bei der Entwicklung der neuen Implantatlegierungen bestand nun darin, durch entsprechende *ab-initio*-Rechnungen zu untersuchen, wie es um die elastischen Eigenschaften der neuen Materialien im Hinblick auf einen späteren Einsatz als Implantatmaterial bestellt ist. Die elastischen Steifigkeit der neuen Titan-Legierungen verlässlich vorhersagen zu können, ist dabei besonders wichtig, da die metallurgische Herstellung und die experimentelle Überprüfung der Elastizität an einer Vielzahl von Proben unterschiedlicher Zusammensetzung mit beträchtlichem Aufwand verbunden sind. Das bedeutet, dass im Falle des Erfolges unserer neuen Strategie zur Werkstoffentwicklung in Zukunft verbesserte oder auch gänzlich neue Materialien um ein Vielfaches schneller entwickelt werden können als bisher und dass eine große Anzahl teurer, aufwändiger und komplizierter Experimente umgangen werden kann.

IM FALLE DES ERFOLGES UNSERER NEUEN STRATEGIE ZUR WERKSTOFFENTWICKLUNG KÖNNEN IN ZUKUNFT VERBESSERTE ODER AUCH GÄNZLICH NEUE MATERIALIEN UM EIN VIELFACHES SCHNELLER ENTWICKELT WERDEN ALS BISHER UND EINE GROSSE ANZAHL TEURER, AUFWÄNDIGER UND KOMPLIZIERTER EXPERIMENTE KANN UMGANGEN WERDEN.



Ein weiterer wertvoller Aspekt der *ab-initio*-Vorhersage der Elastizität einer Probe besteht darin, dass diese sowohl eine Eigenschaft der Elementarzelle ist, also weniger Atome, als auch für eine großformatige Probe, etwa ein Implantat, gilt. Anders gesagt, dient die *ab-initio*-Simulation der elastischen Steifigkeit auch unmittelbar der Vorhersage der makroskopischen Eigenschaften eines Materials, obwohl sie auf atomistischer Skala durchgeführt wurde. Im vorliegenden Fall der von uns untersuchten Titan-Niob- und Titan-Molybdän-Legierungen ist zu erkennen, dass in der Tat eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment erzielt wurde. Im Sinne der im ersten Absatz dargestellten Strategie der neuen Simulationsmethode haben wir somit tatsächlich bereits im zweiten Teilschritt des Ansatzes viele Zehnerpotenzen zwischen den unterschiedlichen Skalen in der Vorhersagetechnik überbrückt und können nunmehr bereits makroskopische Eigenschaften auf der Basis einer *ab-initio*-Simulation vorherhersagen und für die technische Beurteilung eines Werkstoffs unmittelbar heranziehen.

Der dritte Schritt der Materialentwicklung beinhaltet schließlich die Einbindung der elektronentheoretischen Ergebnisse in makroskopische Finite Elemente Rechnungen (die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein mathematisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen, die herangezogen werden, um das Verhalten von Strukturen zu beschreiben; die Lösung der Differentialgleichungen ist für einfache Geometrien und Aufgabenstellungen möglich, nicht jedoch für komplexe diskontinuierliche Systeme, weshalb man die FEM als numerisches Näherungsverfahren nutzt). Besonders relevant bei der Übertragung der *ab-initio*-Simulationen sind dabei einerseits die Gitterstruktur und andererseits die elastischen Konstanten.

Wie oben erwähnt, wurden die Legierungen so entwickelt, dass die kubisch-raumzentrierte Gitterstruktur bei Raumtemperatur stabil ist. Diese Information ist für die Weiterverwendung in den FEM-Rechnungen von Bedeutung, da die Gitterstruktur auch die Freiheitsgrade und damit auch die Richtungsabhängigkeit der elastischen und plastischen (bleibenden) Verformung bestimmt. Die Weitergabe der elastischen Konstanten an die FEM-Simulationen ist wichtig, da sie zwei relevante Informationen beinhalten: erstens die allgemeine elastische Steifigkeit des Materials und zweitens die elastische Anisotropie. Der Begriff der elastischen Anisotropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit der elastischen Eigenschaften des Materials. Um beide Eigenschaften, also die plastische und elastische Richtungsabhängigkeit der neuen Werkstoffe, mit entsprechender physikalischer Detailtiefe in makroskopischen FEM-Simulationen für das abschließende Produktdesign nutzen zu können, wurden auch hier neue Wege beschritten.

Die klassische FEM zur Beschreibung der mechanischen Materialbelastung berücksichtigt in der Regel die innere Struktur des Materials nicht, also auch nicht die oben erläuterten elastischen und plastischen Richtungsabhängigkeiten. Um eine sinnvolle Einbindung der *ab-initio*-Vorhersagen auf der makroskopischen Ebene zu gewährleisten und somit elektronentheoretische Methoden tatsächlich unmittelbar für das Produktdesign einzusetzen, haben wir die klassische FEM zu einer Methode weiterentwickelt (die Kristall-Plastizitäts Finite Elemente Methode), die die kristallografische Natur der elastischen und plastischen Verformung von Metallen im Detail berücksichtigt. Dieser Vorteil allein reicht aber noch nicht aus, weil die meisten metallischen Produkte nicht aus einem einzigen Kristall bestehen, sondern meist aus vielen Milliarden solcher Körner aufgebaut sind, die noch dazu alle anders ausgerichtet (orientiert) sind. Um auch dieses Merkmal zu berücksichtigen, haben wir eine besondere Variante dieser neuen Methode verwendet: Dabei wird eine makroskopische Probe mathematisch in Gruppen ähnlich ausgerichteter Kristalle zerlegt, für die dann jeweils die richtungsabhängigen Eigenschaften (elastisch und plastisch) abgebildet werden. Dieser Ansatz versetzt den Nutzer in die Lage, das Verhalten vielkristalliner Proben in höchster Detailtreue bei elastischer oder plastischer Beanspruchung vorherzusagen und unmittelbar für das Design und die mechanische Optimierung einer makroskopischen Probe zu nutzen.

Auch in diesem letzten Schritt der neuen Skalen überbrückenden Simulationsstrategie zeigt sich der besondere Vorteil der Verknüpfung von *ab-initio*-Methoden und makroskopischen Mechanikmodellen in Zusammenhang mit FEM-Lösungsverfahren: Die *ab-initio*-Vorhersagen zeigten nämlich nicht nur, dass sich beispielsweise im Falle der Titan-Niob-Legierungen durch den Einsatz von Niob tatsächlich die elastische Steifigkeit der Probe deutlich gegenüber den konventionellen hexagonalen Legierungen verringern ließ und sich somit der des Knochens annäherte, sondern dass sich auch die Anisotropie der Elastizität verringerte. Anders gesagt bedeutet dies, dass die neuentwickelte Legierung auf der Basis von Titan und Niob einerseits eine bessere Kompatibilität zwischen menschlichem Knochen und Implantat gewährleistet und andererseits die Richtungsabhängigkeit aus der Verteilung der kristallinen Orientierungen durch eine bessere Isotropie der Eigenschaften bereits auf der Ebene der Elementarzelle deutlich verringert wird. Die letztere Eigenschaft ist von besonderer Bedeutung, da bei der metallurgischen Herstellung von solchen Materialien in der Regel komplexe Orientierungsverteilungen der Kristalle in einer solchen Probe herbeigeführt werden. Bezüglich der



DIE NEUENTWICKELTE LEGIERUNG AUF DER BASIS VON TITAN UND NIOB GEWÄHRLEISTET EINE BESSERE KOMPATIBILITÄT ZWISCHEN MENSCHLICHEN KNOCHEN UND IMPLANTAT. BEZÜGLICH DER ISOTROPIE SIND IHRE ENEIGENSCHAFTEN DEUTLICH WENIGER VON DEN DETAILS DER SPÄTEREN HERSTELLVERFAHREN ABHÄNGIG.

Isotropie (Gleichverhalten in allen Richtungen) sind also die Grundeigenschaften für die von uns neu vorgeschlagenen Legierungen deutlich weniger von den Details der späteren Herstellungsverfahren abhängig.

Neben den dargestellten wissenschaftlich-technischen Vorteilen der von uns vorgeschlagenen Verknüpfung von *ab-initio*-Simulationen und Finite Elemente Methoden zur Überbrückung großer Skalendifferenzen bei der Werkstoffentwicklung liegt ein weiterer wichtiger Vorteil dieser Herangehensweise, gerade im Bereich der Biowerkstoffe, darin, dass die elektronentheoretischen Methoden eine Vorhersage der Stabilität möglicher neuer Legierungen unter der Einschränkung der Auswahl nur ganz bestimmter, nämlich bioverträglicher Legierungselemente erlauben. Auch liefert die Verwendung von *ab-initio*-Ansätzen in diesem Zusammenhang einen beträchtlichen Erkenntnisgewinn bezüglich der elektronischen Wirkung bestimmter Legierungselemente und erlaubt somit Einblicke in die Grundlagen der Bindungstheorie von Werkstoffen.

AUSBLICK HINSICHTLICH ERKENNTNISGEWINN, TECHNOLOGIEENTWICKLUNG UND MARKTCHANCEN

Die hier neu vorgestellte Simulationsstrategie erlaubt wesentliche grundsätzlich neue Einblicke in die Struktur der Materie und der daraus resultierenden Eigenschaften auf der Basis einerseits der elektronischen Ursachen des Materialverhaltens auf atomarer Skala und andererseits des Zusammenwirkens dieser auf der kleinsten Ebene aufgeklärten Eigenschaften im makroskopischen Verbund großer Proben aus vielen Milliarden Kristallen. Damit können quantenmechanische Ansätze erstmals unmittelbar für modernstes Produktdesign eingesetzt werden. Die momentanen Forschungsschwerpunkte innerhalb dieser Strategie liegen auf der atomaren Ebene im Bereich der Fragen zu Details der elektronischen Approximation komplizierter Übergangsmetalle (z. B. die Behandlung der Elektronenkorrelation, magnetischer Phänomene oder der Schwingungsentropie) und auf der makroskopischen Ebene im Bereich der physikalischen Behandlung komplexerer Mikrostrukturen (mehrphasige Gefüge) innerhalb der Finite Elemente Lösungsverfahren. Ein weiterer durchaus aufwändiger Aspekt unserer momentanen Arbeiten in diesem Gebiet liegt in der experimentellen Überprüfung der getroffenen Vorhersagen mit so unterschiedlichen Methoden wie der Elektronenmikroskopie, der mechanischen Werkstoffprüfung, der Spektroskopie, der Röntgenbeugung und der Metallurgie.

Weiteres Augenmerk in diesem Ausblick gilt den ökonomischen Vorteilen der hier skizzierten Handlungsweise. Die Entwicklung neuer Werkstoffe muss heutzutage nicht nur unter wissenschaftlichen und technischen Gesichtspunkten betrachtet werden, sondern auch einer straffen Zeitabfolge und Planbarkeit gehorchen. Eine besonders schnelle, effiziente und gerichtete Werkstoffentwicklung erhöht für Unternehmen bereits in der näheren Zukunft mit Sicherheit die Marktchancen hinsichtlich rascher Patentierung, Optimierung, Darstellbarkeit und der Einführung kundenorientierter maßgeschneiderter Materialangebote. In diesem Zusammenhang ist es offensichtlich, dass die klassischen metallurgisch-mechanischen Ansätze der Materialentwicklung auf der Basis von „try-and-error“-Verfahren sowie unter Zuhilfenahme klassischer empirischer Methoden der Thermodynamik nicht mehr zeitgemäß sind. Genau wie in zahlreichen anderen Hochtechnologiebereichen

EINE BESONDERS SCHNELLE, EFFIZIENTE UND GERICHTETE WERKSTOFFENTWICKLUNG ERHÖHT FÜR UNTERNEHMEN BEREITS IN DER NÄHEREN ZUKUNFT MIT SICHERHEIT DIE MARKTCHANCEN HINSICHTLICH RASCHER PATENTIERUNG, OPTIMIERUNG, DARSTELLBARKEIT UND DER EINFÜHRUNG KUNDENORIENTIERTER MASSGESCHNEIDERTER MATERIALANGEBOTE.



wird der Markterfolg von Unternehmen, die im Bereich der Werkstoffentwicklung tätig sind, zunehmend auch davon bestimmt werden, wie hoch der wissens- und wissenschaftsbasierte Anteil an der Vorgehensweise ist. Insbesondere die hier vorgestellte Skalen überbrückende Simulationsmethode von der Quantenmechanik bis zur FEM verspricht dabei ein wesentliches Ziel geführtere Vorgehensweise als bisher, da die *ab-initio*-Verfahren innerhalb der Entwicklungsphase eine sehr frühe kritische Selektion zwischen Erfolg versprechenden und weniger Erfolg versprechenden Werkstofflösungen erlaubt und darüber hinaus die aussichtsreichsten Ansätze einer gefügeorientierten Optimierung mit Hilfe der FEM zuführt.

PROF. DIERK RAABE AND PROF. JÖRG NEUGEBAUER,
MAX PLANCK INSTITUTE FOR IRON RESEARCH, DÜSSELDORF

New Methods in Material Development

PROBLEM FORMULATION

Constructional and functional materials based on metals, ceramics or polymers have always been synthesized and developed using primarily empirical processes. The development and improvement of such materials were usually based on empirical experience about the effects of particular alloy additives and their influence on strength, hardness or conductivity. On the other hand simple thermodynamic and kinetic rules were used regarding the stability of corresponding simple model alloys. Over the past 15 years, various computer simulation methods have played an increasingly important role in the prediction of new materials. These methods have demonstrated their respective predictive power at individual scales – e.g. at the atomic level or at the continuum scale. However, it is still difficult to calculate macroscopic material properties on the basis of the electronic ground structure.

Given the huge differences in time and size between the atomic and the macroscopic scales it will not be possible in the future to provide a complete theoretical description of a material by combining all successive scales in one simulation. It is possible to illustrate this with one simple example: electronic relaxations take place at picoseconds, whereas corrosion or material fatigue processes take place at a scale of years. Relevant orders of magnitude for spatial scales vary from the sub-Ångström range (less than 10^{-10} meter) to constructions measuring hundreds of meters.

At the Max Planck Institute for Iron Research we have therefore developed a scale-bridging materials simulation method as an alternative to conventional consecutive multiscale simulations in order to make predictions from the electronic level to the macroscale. Here, unlike the successive passing of materi-

al information from scale to scale, quantum mechanical results which were obtained using electron theory, are integrated immediately at the macroscopic level, typically without the need to integrate mesoscopic simulations (scaled from one nanometer to a micrometer). We use this approach to calculate mechanical and thermodynamic properties.

A NEW BIOMATERIAL FOR IMPLANTS AS AN EXAMPLE OF MATERIAL DESIGN DRIVEN BY QUANTUM MECHANICS

In the following we provide evidence of the new approach's success using the example of two biomaterials for implant applications recently developed at the Max Planck Institute for Iron Research. Titanium, the metal typically used in implants, served as the starting point for the development. It is very biocompatible, easy to work and very hard, and therefore a standard material in biomedical technology. More than a million prostheses for the hip area alone are used every year throughout the world. This figure indicates that the development of improved implant materials would not only be a significant challenge to the biomedical technology, but that there are huge opportunities in opening up new markets.

Despite these positive properties, there is a considerable problem in using titanium and related alloys that, as yet, has not been solved: whereas human bone has a modulus of elasticity of around 20 GPa, the equivalent in the titanium implant ranges from 100 to 110 GPa. This discrepancy in mechanical behavior between the bone and the prosthesis in contact with it results in stress shielding. This means that the stresses affecting the part of the body concerned are not carried by the bone but predominantly by the metallic implant. As the bone changes its internal structure and the resulting mechanical strength in relation to the mechanical stresses applied, the artificial relief by the implant leads to weakening in the bone over time. As a result, the bone is damaged and the implant becomes loose. The surface area between the bone and the implant is prone to create infections, which is also a serious problem in this regard. As a rule, the mechanical damage and the resulting infections make replacement of the prosthesis necessary.

With this in mind, we set ourselves the task of producing new titanium-based alloys using a combination of quantum mechanics and continuum theory while, at the same time, rigorously testing the predictions experimentally. These new alloys were to be much less rigid than existing materials and simultaneously exhibit excellent qualities of biocompatibility, strength



THE DEVELOPMENT OF IMPROVED IMPLANT MATERIALS WOULD NOT ONLY BE A SIGNIFICANT CHALLENGE TO THE BIOMEDICAL TECHNOLOGY, BUT THAT THERE ARE HUGE OPPORTUNITIES IN OPENING UP NEW MARKETS.

and hardness. This is the only way to achieve greater mechanical compatibility and thus considerably longer life for implants in the human body. Quantum mechanical calculations show that titanium occurs at temperatures below 882°C with hexagonal crystal structure while the body-centered cubic crystal structure is unstable at room temperature. Since the body-centered cubic crystal structure of titanium is supposed to have a much smaller elastic stiffness, our approach consisted in developing a suitable alloy to stabilize the body-centered cubic lattice structure also at room temperature.

For this purpose we looked at alloys of titanium with the biocompatible body-centered cubic metals niobium and molybdenum. The first step was to examine the stability of different alloys of titanium and niobium and titanium and molybdenum using *ab initio* modeling methods (i.e. approaches which do not require empirical parameters). Guided by these theoretical predictions, we then used metallurgical smelting processes to produce promising samples that we examined in detail using electron microscopy and x-ray diffraction to compare with the *ab initio* predictions made previously regarding their structure. The quantum mechanical calculations and the experiments on the metallurgically produced samples did indeed show that by increasing the content of niobium or molybdenum in the titanium, the metal's body-centered cubic structure can be stabilized at room temperature.

The second important step in the development of the new implant alloys then consisted in using the appropriate *ab initio* calculations to examine the elastic properties of the new materials with respect to their subsequent use as implant materials. It is particularly important to be able to predict accurately the modulus of elasticity of the new titanium alloys as the metallurgical production and the experimental investigation of the elasticity in a large number of samples involves considerable efforts. This means that, should our new strategy for material development be successful, it will be possible in future to develop improved or even completely new materials much faster than it has been previously the case, as well as avoiding a large number of expensive, laborious and complicated experiments.

Another valuable aspect of the *ab initio* prediction of a sample's elasticity is that this is both a characteristic of the lattice cell, i.e. of a few atoms and also of a large sample, such as an implant. In other words, the *ab initio* simulation of the elastic modulus may serve directly to predict a material's macroscopic properties, although it is carried out at the electronic scale.

In the case of the titanium-niobium and titanium-molybdenum alloys that we examined, it is evident that an excellent correspondence between the theory and the experiment has genuinely been achieved. As defined by the strategy for the new method of simulation presented in the first paragraph, in the second stage of the approach we have already bridged many orders of magnitude between the different scales using *ab initio* simulation methods and can now predict macroscopic properties on the basis of an *ab initio* simulation and use them for a direct technological assessment of a material.

IF OUR NEW STRATEGY FOR MATERIAL DEVELOPMENT SHOULD BE SUCCESSFUL, IT WILL BE POSSIBLE IN FUTURE TO DEVELOP IMPROVED OR EVEN COMPLETELY NEW MATERIALS MUCH FASTER THAN IT HAS BEEN PREVIOUSLY THE CASE, AS WELL AS AVOIDING A LARGE NUMBER OF EXPENSIVE, LABORIOUS AND COMPLICATED EXPERIMENTS.



The third stage of the material's development involved the integration of the electron theory results into macroscopic Finite Element Calculations (the Finite Element Method (FEM) is a mathematical method of solving differential equations used to describe the deformation behavior of larger structures. It is possible to solve differential equations for simple geometries and formulations, but not for complex discontinuous systems, which is why FEM is used as a numerical approximation process). Particularly relevant to the transfer of *ab initio* simulations are, on the one hand, the lattice structure and, on the other, the elastic constants. As mentioned above, the alloys were developed to make the body-centered cubic lattice structure stable at room temperature. This information is important for the subsequent use in the FEM calculations as the lattice structure determines the degrees of freedom and thus also the anisotropy of the elastic and plastic distortion. Passing on the elastic constants to the FEM simulations is important because they contain two important pieces of information: first, the general elasticity modulus of the material and second, the elastic anisotropy. Elastic anisotropy is the term that describes the directional dependency of the material's elastic

properties. New avenues have also been followed that will allow the use of both properties, the plastic and elastic anisotropy of the new materials, with appropriate physical details in macroscopic FEM simulations for the final product design.

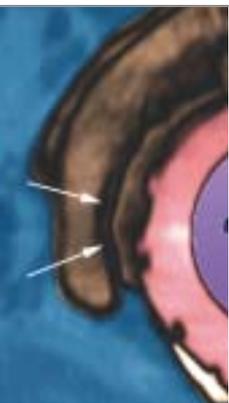
Classical FEM used to describe mechanical properties of materials do usually not take into account the material's inner structure, which reflects also the elastic and plastic anisotropy mentioned above. In order to ensure a meaningful integration of the *ab initio* predictions also at the macroscopic level, and thus, to use electron theory methods directly for product design, we have rendered classical FEM into an advanced FE approach that takes into account the detail of the crystallographic nature of the elastic and plastic deformation of metals (the crystal-plasticity Finite Element Method). However, this advantage is not sufficient of its own since most metallic products do not consist of a single crystal, but usually of many billions of these grains which are furthermore all oriented differently. In order to take this feature into account as well, we have developed a special variant of this new method. In this method, a macroscopic sample is mathematically broken down into groups of similarly oriented crystals for which the anisotropic properties (elastic and plastic) are mapped. This approach allows the user to predict, down to the finest detail, the behavior of multi-crystalline samples under elastic or plastic stress, and to use a macroscopic sample directly for design and mechanical optimization.

This final stage of the new scale-bridging simulation strategy also reveals the special advantage of linking *ab initio* methods and macroscopic mechanical models in association with FEM solving methods: the *ab initio* prediction shows not only that, in the case of the titanium-niobium alloys, for example, the use of niobium really did considerably lower the sample's modulus of elasticity as compared to the conventional hexagonal alloys (so that it approached that of bone), but also that the anisotropy of the elasticity was reduced. In other words, this means that the newly developed alloy based on titanium and niobium, on the one hand, ensures better compatibility between the human bone and the implant and, on the other hand, that the anisotropy arising from the distribution of the crystalline orientations is markedly reduced with a better isotropy of the properties at the elementary lattice level. The latter property is particularly significant since in the metallurgical manufacturing of such materials complex distributions of orientation of the crystals are, as a rule, induced in a sample of this kind. Regarding the isotropy (the same behavior in all directions) the final properties for the new alloys proposed by us are much less dependent on the details of the subsequent manufacturing process.

Besides these scientific and technical benefits of combining *ab initio* simulations and finite element methods to bridge large-scale differences in material development, as proposed here, this approach has another important advantage that applies particularly in the biological materials area: the methods using electron theory only permit prediction of the stability of potential new alloys within the limitations of a very specific selection, i.e. biocompatible alloy elements. The use of *ab initio* approaches in this context also delivers a considerable gain in knowledge regarding the electronic effects of certain alloy elements and thus permits insight into the principles of material bonding theory.

PROSPECTS REGARDING ATTAINMENT OF KNOWLEDGE, TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT AND MARKET OPPORTUNITIES

The simulation strategy presented here for the first time permits significant, fundamentally new insight into the structure of materials and the resulting properties based, on the one hand, on the electronic origins of the material behavior on the atomic scale and, on the other hand, the interaction of these properties detected on the smallest level in a large macroscopic sample



THE NEWLY DEVELOPED ALLOY BASED ON TITANIUM AND NIOBIUM ENSURES BETTER COMPATIBILITY BETWEEN THE HUMAN BONE AND THE IMPLANT. REGARDING THE ISOTROPY FINAL PROPERTIES FOR THE NEW ALLOYS ARE MUCH LESS DEPENDENT ON THE DETAILS OF THE SUBSEQUENT MANUFACTURING PROCESS.

made up of millions of crystals. This allows quantum mechanical approaches to be used directly for the first time in the most contemporary product design. Research as part of this strategy at electronic level currently focuses on electronic approximation of complicated transition metals (e.g. the treatment of electron correlation, magnetic phenomena or vibration entropy), and on the macroscopic level on the treatment of complex microstructures (multiphase structures) within the Finite Element solution process. Another extremely laborious aspect of our current work in this area is the experimental examination of predictions with different methods, such as the electron microscope, mechanical material testing, spectroscopy, X-ray diffraction and metallurgy.

The economic benefits of the procedure outlined here also merit attention. The development of new materials must nowadays not only be considered from the scientific and engineering point of view, but also adhere to strict chronologies and forecast reliability. Particularly fast, efficient and focused development of a material certainly increases market opportunities for companies in the near future with rapid patenting, optimization, presentation and launch of customer-oriented tailor-made material products. In this context, it is obvious that the classical metallurgical-mechanical approaches to material development based on trial and error and using traditional empirical thermodynamic methods are no longer sufficient. Just as in numerous other high technology areas, the market success of companies engaged in material development is increasingly determined by how strong the knowledge and science-based component of the approach is. In particular, the scale-bridging simulation method described here from quantum mechanics to FEM promises a substantially more focused approach than previously, as the *ab initio* method within the development phase permits a critical choice very early on between material solutions that promise success and those that do not and, furthermore, delivers the encouraging beginnings of structure-oriented optimization with the aid of FEM.

FAST, EFFICIENT AND FOCUSED DEVELOPMENT OF A MATERIAL CERTAINLY INCREASES MARKET OPPORTUNITIES FOR COMPANIES IN THE NEAR FUTURE WITH RAPID PATENTING, OPTIMIZATION, PRESENTATION AND LAUNCH OF CUSTOMER-ORIENTED TAILOR-MADE MATERIAL PRODUCTS.





PROF. DR. MARTIN HELLWIG

MAX-PLANCK-INSTITUT ZUR ERFORSCHUNG VON GEMEINSCHAFTSGÜTERN, BONN

Zur Privatisierung staatlicher Tätigkeiten

Als ich in den siebziger Jahren in den USA studierte und arbeitete, empfand ich es als paradox, dass ein Telefongespräch von den USA nach Deutschland ungefähr halb so viel kostete wie ein Telefongespräch von Deutschland in die USA. In den USA hatte man es nach den damals in meiner Altersgruppe vorherrschenden Vorstellungen mit einem auf Ausbeutung erpichteten privaten Kapitalisten zu tun, in Deutschland mit einer dem Gemeinwohl verpflichteten Behörde – und das Ergebnis war das Gegenteil dessen, was die Ideologie erwarten ließ.

Inzwischen hat sich einiges geändert. Die für Telekommunikation zuständige staatliche Behörde in Deutschland ist in ein Unternehmen umgewandelt und privatisiert worden. Auf beiden Seiten des Atlantiks sind die Märkte für Wettbewerb geöffnet worden. Das Gespräch über den Atlantik kostet nur einen Bruchteil von dem, was vor zwanzig Jahren zu bezahlen war – in beiden Richtungen!

Wenn dereinst ein Wirtschaftshistoriker über Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten arbeitet, wird er versucht sein, von einer Ära der Privatisierung zu reden. Der Privatisierung der „volkseigenen Betriebe“ in der früheren DDR folgte die Privatisierung von Telekom und Post. In der jüngeren Vergangenheit wurden etliche Krankenhäuser privatisiert, darunter die Universitätskliniken in Gießen und Marburg. Im vergangenen Jahr gaben die Vorhaben einer Privatisierung der Deutschen Bahn und der Deutschen Flugsicherung Anlass zur Diskussion.

Wie ist es zu dieser Entwicklung gekommen? Gibt es Grenzen der Privatisierung? Oder ist alles, was wir früher über die Rolle des Staates als Garant der Infrastruktur des Landes geglaubt haben, als überholt anzusehen und ad acta zu legen? Im folgenden Beitrag will ich einige für diese Fragen maßgebliche Aspekte aufzeigen. Der Beitrag stützt sich auf grundsätzliche theoretische Arbeiten und auf wirtschaftspolitische Arbeiten zu aktuellen Themen¹.

1. PRIVATISIERUNG – WARUM?

Am Anfang der Privatisierungswelle standen Mrs. Thatcher, die Wende von 1989/1990 und das graue Telefon mit einer Drehscheibe zum Wählen. Mrs. Thatchers Privatisierungsexperimente zeigten, dass der Börsengang öffentlicher Unternehmen Geld in die Staatskasse spült; bei nachhaltig knappen Kassen gab das auch Skeptikern zu denken. Die Wende hob ins Bewusstsein, dass es bei der Erstellung von Gütern und

Dienstleistungen nicht nur Marktversagen, sondern auch Staatsversagen geben kann; die Privatisierung der früheren Staatswirtschaften gab Anlass, auch über die eigenen Staatsunternehmen nachzudenken.

Das graue Telefon mit Drehscheibe schließlich wurde zum Symbol für technologische Rückständigkeit. Während andersorts drahtlose Telefone mit Tastatur benutzt wurden, bestand die Deutsche Bundespost noch darauf, dass nur dieses graue Telefon benutzt würde, da alle anderen Apparate das Netz schädigen könnten. Deutschland schien die technische Revolution in der Telekommunikation zu verschlafen. Die Umwandlung von einem Behördenapparat in ein Unternehmen und die Öffnung der neuen Mobilfunktechnologie für den Wettbewerb sollten dieser Gefahr vorbeugen.

GIBT ES GRENZEN DER PRIVATISIERUNG? ODER IST ALLES, WAS WIR FRÜHER ÜBER DIE ROLLE DES STAATES ALS GARANT DER INFRASTRUKTUR DES LANDES GEGLAUBT HABEN, ALS ÜBERHOLT ANZUSEHEN UND AD ACTA ZU LEGEN?



Die hier angesprochenen Themen prägen die Diskussion bis heute. Die Umwandlung staatlicher Unternehmen und Behörden in private Unternehmen wird damit begründet, dass dadurch die öffentlichen Haushalte entlastet und Kosten gesenkt werden sowie die Qualität der Angebote verbessert wird. Finanzminister und Stadtkämmerer gehören zu den stärksten Befürwortern. Dabei denken sie nicht nur an die Privatisierungserlöse, sondern auch an die Elimination von Haushaltsrisiken.

Es mag paradox erscheinen, dass das, was der Finanzminister oder Stadtkämmerer als Haushaltsrisiko betrachtet, von einem privaten Investor als Gewinnchance angesehen wird, für deren Erwerb er bares Geld bezahlt. Das Paradox löst sich auf, wenn die Privatisierung eine bedeutende Effizienzsteigerung mit sich bringt. Die „Gelbe Post“ etwa erwirtschaftete in der Vergangenheit regelmäßig ein Defizit und macht heute mit denselben Tätigkeiten erhebliche Gewinne. Ähnliches gilt für den Betrieb der Bahn und für die privatisierten Krankenhäuser.

Spielräume für Effizienzsteigerungen bei der Privatisierung ergeben sich regelmäßig daraus, dass beim Staat die Personalkosten überhöht sind, Produktion und Vertrieb ineffizient organisiert sind und die Flexibilität zum Eingehen auf neue Entwicklungen und neue Kundenwünsche fehlt. Bei der Deutschen Bahn wie bei der Deutschen Post sind schon im Vorfeld des jeweiligen Börsengangs Arbeitsplätze in sechsstelliger Größenordnung abgebaut worden – bei insgesamt gleich bleibenden oder sogar wachsenden Leistungen. Dass dieser Arbeitsplatzabbau sozial verträglich gestaltet wurde, ist eine bemerkenswerte Leistung. Dass er überhaupt möglich war, wirft allerdings die Frage auf, warum die frühere Staatsbahn und Staatspost – im Westen wie im Osten – so viele Leute beschäftigten, die für die erstellten Leistungen gar nicht benötigt wurden.

Nach dieser Logik liegt der Nutzen der Privatisierung für die Volkswirtschaft insgesamt darin, dass private Unternehmen die Ressourcen an Arbeit und Kapital, die der Volkswirtschaft zur Verfügung stehen, sparsamer und zweckdienlicher einsetzen. Dadurch steigt ihre Produktivität. Das wiederum ermöglicht eine Verbesserung des Lebensstandards. Letztlich ist dies nichts anderes als das Argument, dass ein Marktsystem mit privaten Unternehmen gegenüber anderen Organisationsformen der Wirtschaft überlegen ist. Was aber ist aus all den Erwägungen geworden, die in der Vergangenheit dafür sorgten, dass man diese Aktivitäten nicht dem freien Spiel der Märkte überließ? Auf einige will ich im Folgenden eingehen.



**IN DER VERGANGENHEIT BETRAF DAS MONOPOL-
PROBLEM NICHT NUR DAS JEWEILIGE NETZ,
SONDERN AUCH DIE VERSCHIEDENEN DIENST-
LEISTUNGEN, DIE AUF DEM NETZ ERBRACHT
WERDEN.**

2. DAS MONOPOLPROBLEM DER NETZINDUSTRIEN

Die großen Netze der Telekommunikation, der Energiewirtschaft und der Bahn werden gemeinhin als „natürliche Monopole“ betrachtet.² Es ist ökonomisch nicht sinnvoll, diese Netze mehr als einmal zu erstellen. Die Inhaber dieser Netze haben daher Monopolmacht. In der Vergangenheit wurde staatliche Zuständigkeit für diese Sektoren u. a. mit dem Schutz der Verbraucher vor dieser Monopolmacht begründet. Weitere

Gründe ergaben sich aus Machtinteressen, etwa dem Interesse des Militärs am Fernmeldewesen und der Eisenbahn, sowie dem Wunsch, die Gleichmäßigkeit der Versorgung im ganzen Land sicherzustellen.

Das Monopolproblem besteht nach wie vor. In einzelnen Netzindustrien ist es kleiner geworden, weil die Nutzer auf andere Netze ausweichen können. So hat das Vordringen des Mobilfunks die auf dem Festnetz beruhende Monopolmacht deutlich eingeschränkt. Die auf das Eisenbahnnetz gegründete Macht wird durch den intermodalen Wettbewerb, d.h. die Möglichkeit eines Ausweichens auf die Straße oder den Luftverkehr, beschränkt. Bei der Energiewirtschaft dagegen sind die Verteilungsnetze der lokalen und regionalen Strom- und Gasversorger nach wie vor die Grundlage für erhebliche Monopolmacht, desgleichen die Übertragungs- und Transportnetze der Verbundunternehmen der Stromwirtschaft und der Ferngasunternehmen.

In der Vergangenheit betraf das Monopolproblem nicht nur das jeweilige Netz, sondern auch die verschiedenen Dienstleistungen, die auf dem Netz erbracht werden – Telefongespräche, Strom- und Gaslieferungen, Eisenbahnfahrten. Bei diesen Dienstleistungen jedoch handelt es sich nicht um natürliche Monopole. Es gibt keinen Grund dafür, dass sie nur von einem Unternehmen angeboten werden, außer dem, dass der Inhaber des Netzes es möglicherweise ablehnt, anderen Unternehmen die Nutzung des Netzes zu ermöglichen. Letzteres war in der Vergangenheit üblich, teilweise sogar durch staatliche Vorschriften zum Schutz vertikal integrierter Monopole geschützt.

Die Erfahrungen der USA und Großbritanniens haben jedoch gezeigt, dass der Wettbewerb anderer Unternehmen bei diesen Dienstleistungen die Marktergebnisse für die Kunden deutlich verbessert, für niedrigere Preise und bessere Qualität sorgt. Die Neuordnung der Netzindustrien seit Mitte der 1990er-Jahre sieht daher vor, dass der Netzinhaber jeweils anderen Unternehmen die Möglichkeit gibt, eigene Dienstleistungen anzubieten und zu diesem Zweck das Netz zu benutzen.

In Deutschland war dieses Modell im Bereich der Telekommunikation ein großer Erfolg. Die Liberalisierung dieser Märkte hat die Preise purzeln lassen, und die Lebensqualität derer, die auf Telekommunikation angewiesen sind, spürbar erhöht. In der Energiewirtschaft dagegen kam es nur kurzfristig zu Strompreissenkungen, mittelfristig jedoch zu erhöhter Konzentration und zu Preiserhöhungen, zuerst bei den Netzentgelten, ab 2001 auch beim Strom selbst.³

Der Unterschied zwischen beiden Sektoren ist vor allem damit zu erklären, dass das Netzzugangsregime bei der Telekommunikation von Anfang an gesetzlich klar fixiert war und die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post unmittelbar die Kontrolle über die Zugangspreise hatte. Bei der Energiewirtschaft fehlte diese Regulierung bis 2005. Bis dahin konnten die Netzinhaber überhöhte Netznutzungsentgelte verwenden, um Wettbewerb bei der Lieferung von Strom auf ein Minimum zu reduzieren.

Bei einem Vergleich verschiedener Länder ist festzustellen, dass die Auflösung der Monopole bei Dienstleistungen, die die Netze benutzen, vor allem dort gelungen ist, wo Netze und Dienstleistungen materiell voneinander getrennt wurden. Der jeweilige Netzinhaber hat dann keinen Anreiz, seine Macht über das Netz zu benutzen, um andere Unternehmen zu behindern und so sein Monopol vom Netz auf die Dienstleistungen auszudehnen. Aufgrund dieses Befundes hatte die Monopolkommission 2002 vorgeschlagen, bei der Deutschen Bahn AG für eine materielle Trennung von Netz und Betrieb zu sorgen. Da die Deutsche Bahn AG noch zu 100% im Eigentum des Staates ist, käme eine solche Auflage nicht in Konflikt mit dem verfassungsrechtlichen Schutz des privaten Eigentums. In der Energiewirtschaft, für die ein entsprechender Vorschlag kürzlich von der Europäischen Kommission gemacht wurde, sind die Unternehmen zu erheblichen Teilen in privater Hand. Hier gäbe es verfassungsrechtliche Einwände gegen eine staatlich verordnete Trennung von Netz und Betrieb.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Das Monopolproblem der Netzindustrien besteht nach wie vor. Man hofft, es zu kontrollieren, indem man die Öffnung der Netze für andere Unternehmen erzwingt. Das setzt eine funktionsfähige Zugangsregulierung voraus. Die Zugangsregulierung muss insbesondere auch die Zugangsentgelte erfassen und Überhöhungen verhindern. Darüber hinaus muss sie versuchen, etwaige Behinderungen auf der Ebene der Qualität, Pünktlichkeit und Verlässlichkeit der Zugangsleistungen so weit wie möglich auszuschalten.

3. NETZE ALS GEMEINSCHAFTSGÜTER

Wann aber sind die Zugangsentgelte für Netze überhöht? Die Kontrolle von Preisen durch eine Behörde wirft rechtliche und konzeptionelle Schwierigkeiten auf. Die Verpflichtung, anderen Unternehmen zu einem behördlich kontrollierten Preis den Zugang zum Netz zu gewähren, beruht auf der Vorstellung, dass das Netz auch nach der Privatisierung noch als Gemeinschaftsgut zu betrachten ist. Wie verträgt sich das mit dem

verfassungsmäßigen Schutz des Privateigentums? Wie kann man sicherstellen, dass die privatwirtschaftlich arbeitenden Netzunternehmen noch einen Anreiz haben, in ihre Netze zu investieren? Welche Verzinsung benötigen sie dafür?

Die vorstehenden Fragen klingen kompliziert, sind aber zumindest konzeptionell weitgehend gelöst. Konzeptionell nicht gelöst sind demgegenüber die Fragen, die sich ergeben, wenn das betreffende Netz sich privatwirtschaftlich gar nicht tragen kann, sondern auf Zuschüsse aus dem allgemeinen Staatshaushalt angewiesen ist.

DIE AUFLÖSUNG DER MONOPOLE BEI DIENSTLEISTUNGEN, DIE DIE NETZE BENUTZEN, IST VOR ALLEM DORT GELUNGEN, WO NETZE UND DIENSTLEISTUNGEN MATERIELL VONEINANDER GETRENNT WURDEN.



Dieser Fall liegt bei der Eisenbahn vor. Während die Netze der Telekommunikation und der Energiewirtschaft aus den Entgelten für die Netznutzung finanziert werden, ist das Netz der Bahn auf staatliche Zuschüsse angewiesen. Erhöhungen der Entgelte für die Netzleistungen bzw. die mit dem Netz erbrachten Transportleistungen würden den Verkehr noch weiter von der Schiene auf die Straße oder in die Luft bringen. Der Eisenbahnverkehr würde dramatisch eingeschränkt. Ob das System Bahn sich danach finanziell tragen könnte, sei dahingestellt. Es würde jedenfalls nicht mehr dem entsprechen, was das Gemeinwesen will.

Nach Art. 87e des Grundgesetzes gewährleistet der Bund, dass beim Ausbau und Erhalt des Schienennetzes der Bahn dem Wohl der Allgemeinheit Rechnung getragen wird. Aufgrund dieser Gewährleistungspflicht leistet der Bund jährliche Baukostenzuschüsse für das Netz der Bahn. In elf Jahren nach der Bahnreform von 1994 beliefen sich diese auf insgesamt 38,4 Mrd. EUR; für die Zukunft ist ein Betrag von jährlich 2,5 Mrd. EUR vorgesehen.⁴ Ohne diese Zuschüsse wären die Eigenkapitalrenditen der Deutschen Bahn AG regelmäßig negativ. An einen Börsengang wäre nicht zu denken.

Die Vorstellung, dass die Deutsche Bahn AG in nicht allzu ferner Zukunft in der Lage sein sollte, als integriertes Unternehmen mit Netz und Betrieb zusammen die von privaten Investoren erwarteten positiven Eigenkapitalrenditen zu erwirtschaften, setzt voraus, dass die Baukostenzuschüsse des Bundes weiter verlässlich fließen. Bei einem Börsengang des integrierten Unternehmens würde man also den privaten Investoren die Aussicht auf zukünftige Bundessubventionen verkaufen. Darauf werden sie sich nur einlassen, wenn diese Subventionen vertraglich oder gesetzlich so fixiert sind, dass der Bund nach dem Börsengang keine Möglichkeit mehr hat, von dieser Verpflichtung loszukommen.

Wie aber werden diese Mittel verwandt? Nach dem Verfassungsauftrag soll ihre Verwendung dem Wohle der Allgemeinheit dienen. Das Unternehmen Deutsche Bahn AG hat als Wirtschaftsunternehmen eigene Interessen. Von Seiten des Unternehmens wird gefordert, allein auf die betrieblichen Erfordernisse abzustellen. Dabei wird verdrängt, dass die Zuschüsse des Bundes vom Steuerzahler kommen, der dafür ein Eingehen auf Belange der Allgemeinheit erwartet. Man kann darüber streiten, in welchem Ausmaß der Staat etwa für regionalpolitische Belange bei der Trassenführung Geld ausgeben sollte. Wenn der Staat allerdings Geld ausgibt, sollte er auch die Möglichkeit haben, bei der Verwendung der Mittel mitzureden und die Interessen der Allgemeinheit zur Geltung zu bringen. Hierin liegt ein unlösbarer Konflikt. Wenn der Bund bei der Verwendung der Baukostenzuschüsse mitredet, kann er auch bestimmte Mittelverwendungen verweigern. Dann aber ist die Verlässlichkeit der Mittel insgesamt infrage gestellt.



DER VERSUCH EINER PRIVATISIERUNG OHNE ENTLASSUNG DES STAATES AUS DER FINANZIELLEN VERANTWORTUNG LÄUFT AUF EINE QUADRATUR DES KREISES HINAUS.

Die Befürworter eines integrierten Börsengangs schlagen vor, die Höhe der Baukostenzuschüsse und ihre Verwendung durch eine auf zehn Jahre angelegte Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung festzulegen. Wenn eine solche Vereinbarung al-

les regeln könnte, was zu regeln ist, so würde sich die weitere Diskussion erübrigen. Tatsächlich aber können Verträge nie alles regeln. Es gibt immer wieder Entwicklungen, die zum Zeitpunkt des Vertragsschlusses nicht vorherzusehen waren und für die deshalb keine vertraglichen Vorkehrungen getroffen sind. Dann kommt es darauf an, wer für die anfallenden Entscheidungen zuständig ist. Im Normalfall ist dies der Eigentümer – diese Rollenzuweisung ist eine Funktion des Rechtsinstituts Eigentum. Für die anderen Beteiligten liegt darin eine Gefahr. Sie können versuchen, dieses Governance-Problem durch vertragliche Mitspracherechte zu lösen. Das Risiko opportunistischen Verhaltens würde damit aber nur von einer Vertragspartei auf die andere verlagert.

Der hier angesprochene Konflikt ist paradigmatisch für das Vorhaben der Privatisierung von Gemeinschaftsgütern, die sich wirtschaftlich nicht selbst tragen. Privatisierung bedeutet Eigentumsübertragung an Personen oder Unternehmen, die ihre eigenen Interessen verfolgen. Damit ist normalerweise auch ein Übergang der wirtschaftlichen Verantwortung und der Haftung verbunden. Wenn der Staat aber nach wie vor für die Kosten einsteht, bleibt der Haftungsübergang Stückwerk. Der Versuch einer Privatisierung ohne Entlassung des Staates aus der finanziellen Verantwortung läuft auf eine Quadratur des Kreises hinaus.

4. INTERESSENKONFLIKTE DES STAATES

Die Privatisierung der Netzindustrien bringt noch weitere Governance-Probleme mit sich: Der Staat tritt in vielfältigen Funktionen auf. Zunächst obliegt ihm die Zugangsregulierung als hoheitliche Aufgabe. Bei der Bahn obliegt ihm ferner die Verantwortung für das Netz. Soweit er noch Aktien des betreffenden Unternehmens hält, steht er mit in der Verantwortung für den privatwirtschaftlichen Erfolg. Schließlich tritt er auch als Kunde auf, so etwa, wenn die Länder mit Bestellerentgelten bestimmte Zugverkehre für den Schienenpersonennahverkehr einkaufen.

Die Vielfalt der Funktionen schafft etliche Interessenkonflikte. Der Verantwortung für Zugangsregulierung als Grundlage funktionsfähigen Wettbewerbs in den nachgelagerten Märkten steht das Interesse des Aktionärs an Gewinnen des Monopolunternehmens gegenüber. Dem Gewinninteresse des Aktionärs steht das Interesse des Kunden an günstigen Angeboten gegenüber. Dem Gewinninteresse des Aktionärs steht auch das Interesse des Finanzministers an einer Beschränkung der Baukostenzuschüsse gegenüber. Die angesprochenen Konflik-

te lösen sich weitgehend auf, wenn sich das Unternehmen insgesamt wirtschaftlich trägt und ohne weitere Beteiligung des Staates vollständig privatisiert wird. Dann bleibt nur die Regulierung als Staatsaufgabe. Diese ist schwierig genug, ist aber für sich genommen nicht mit Interessenkonflikten belastet.

Anders sieht es aus, wenn das Unternehmen insgesamt sich nicht trägt und der Staat nach wie vor in der Verantwortung für das Netz als Gemeinschaftsgut steht. Im Fall der Bahn sieht das Grundgesetz vor, dass der Bund mindestens 51% des Unternehmens, dem das Netz gehört, behalten muss. Mit dieser Kontrollmehrheit hat er einerseits seiner Verantwortung für die Infrastruktur nachzukommen, andererseits die aktienrechtlichen Pflichten eines Mehrheitsaktionärs zu erfüllen. Die Doppelfunktion als Wahrer des öffentlichen Interesses und als Organ einer börsennotierten Aktiengesellschaft verwischt Zuständigkeiten und erschwert die Zurechnung von Verantwortung. Die privaten Investoren müssen befürchten, dass der Bund mit seiner Mehrheit Entscheidungen durchsetzt, die sie belasten, z.B. Dividendenausschüttungen ablehnt, um Mittel einzubehalten und in die Bahninfrastruktur investieren zu lassen. Dieser Interessenkonflikt wäre nur zu vermeiden, wenn Transportgeschäft und Netz vollständig getrennt würden und der Bund seine Anteile am Transportgeschäft vollständig veräußerte.

Ein anderer Interessenkonflikt wäre allerdings auch dann nicht zu vermeiden. Da das Netz der Bahn teilweise durch Zuschüsse des Bundes finanziert wird, kann man bei der Festlegung der Zugangsentgelte nicht so vorgehen wie bei den anderen Netzindustrien und sich einfach an den Kosten der effizienten Leistungsbereitstellung orientieren. Die Vorstellung, die Trassen-

preise sollten eine risikoadäquate Verzinsung des eingesetzten Kapitals ermöglichen, stände im Widerspruch zu dem Befund, dass Bundessubventionen erforderlich sind. Hier kommt es zu einem Konflikt zwischen dem Anliegen, durch niedrigere Trassenpreise für mehr Wettbewerb und mehr Effizienz in der Nutzung der Infrastruktur zu sorgen, und dem Anliegen, durch hohe Trassenpreise den Subventionsbedarf für das Netz zu begrenzen.⁵

DIE GEMEINSCHAFTSANLIEGEN, DIE URSPRÜNGLICH ZUR ÜBERNAHME IN STAATLICHE HAND GESORGT HABEN, SIND NACH WIE VOR RELEVANT. EINE VERNACHLÄSSIGUNG DIESER GEMEINSCHAFTSANLIEGEN BIRGT DAS POTENZIAL FÜR ZUKÜNFTIGE FEHLENTWICKLUNGEN.



Die Privatisierung staatlicher Aufgaben sorgt regelmäßig dafür, dass der erforderliche Aufwand drastisch gesenkt wird. Die Gemeinschaftsanliegen, die ursprünglich zur Übernahme in staatliche Hand gesorgt haben, sind aber nach wie vor relevant. Eine Vernachlässigung dieser Gemeinschaftsanliegen birgt das Potenzial für zukünftige Fehlentwicklungen. Für Wissenschaft und Politik gilt es, Governance-Mechanismen zu finden, die dafür sorgen, dass einerseits die betreffenden Aufgaben effizient durchgeführt werden, andererseits den Gemeinschaftsanliegen Rechnung getragen wird.

LITERATUR

M.F. Hellwig, The Provision and Pricing of Excludable Public Goods, Ramsey-Boiteux Pricing versus Bundling, *Journal of Public Economics* 91 (2007), 511-540.
M.F. Hellwig, Stellungnahme bei der Öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages zur Privatisierung der Deutschen Bahn AG am 10. Mai 2006.

1] Ein Überblick findet sich unter http://www.coll.mpg.de/pdf_dat/ReportCI.pdf und http://www.coll.mpg.de/pdf_dat/ReportCIII.pdf.

2] Ob das Zustellnetz der Post genauso einzuordnen ist wie die hier genannten physischen Netze, ist umstritten.

3] Die Strompreiserhöhungen von 2001 bis 2003 sind wohl überwiegend auf die gestiegene Konzentration zurückzuführen, die seitherigen Strompreiserhöhungen überwiegend auf die Erhöhung der Primärenergiepreise und die Einführung der CO₂-Zertifikate.

4] Zum Vergleich: Der Umsatz der Deutschen Bahn AG lag ohne die Akquisitionen von nicht schienenengebundenen Logistikunternehmen durchweg in einer Größenordnung von 15 Mrd. EUR; die Geschäftsergebnisse jeweils im dreistelligen Millionenbereich.

5] Allerdings kommen niedrige Trassenpreise auch den öffentlichen Haushalten zugute, denn eine Zunahme des Wettbewerbs auf der Schiene senkt die Kosten, die die Länder für Bestellungen beim Personennahverkehr aufbringen müssen.

PROF. DR. MARTIN HELLWIG,
MAX PLANCK INSTITUTE FOR RESEARCH ON COLLECTIVE GOODS, BONN

On the Privatization of State Activities

In the seventies when I studied and worked in the USA, I found it something of a paradox that a telephone call from the USA to Germany costs only around half as much as a call from Germany to the US. In the prevailing opinion shared by my age group in those days, the service in the USA was provided by private sector capitalists bent on exploitation, whereas that in Germany of a public-sector authority committed to the common good. Yet the outcome was the opposite of what this ideology might lead one to suppose.

In the meantime, things have changed. The government body responsible for telecommunications in Germany has been privatized and become a business undertaking. The markets on both sides of the Atlantic have been opened up to competition. And a transatlantic call now costs a fraction of what it did twenty years ago – in both directions!



ARE THERE LIMITS TO PRIVATIZATION? OR IS EVERYTHING WE ONCE BELIEVED ABOUT THE ROLE OF THE STATE AS GUARANTOR OF OUR NATIONAL INFRASTRUCTURE NOW TO BE REGARDED AS OUT-DATED AND DONE WITH?

When the time comes to write a history of the German economy in recent decades, the author will be sorely tempted to describe the period as an era of privatization. The privatization of the “volkseigene Betriebe”, the “People’s Own” undertakings in the former East Germany, was followed by privatization of German Telekom and postal services. In the more recent past, numbers of hospitals have been privatized, among them the University Clinics in Gießen and Marburg. And last year there was talk of privatizing the railways (Deutsche Bahn) and even air traffic control (Deutsche Flugsicherung).

How did we get this far? Are there limits to privatization? Or is everything we once believed about the role of the state as guarantor of our national infrastructure now to be regarded as out-dated and done with? In the following essay I propose to highlight some of the principal aspects surrounding these questions. The essay is based upon purely theoretical work, as well as on economic policy studies of current issues.

1. PRIVATIZATION – WHY?

The wave of privatization first began to swell in the days of Margaret Thatcher, the political watershed of 1989/1990 and the grey telephone with a disk for dialing. Mrs. Thatcher’s experiments with privatization proved that floating public-sector businesses on the stock market brought a flood of cash into government coffers. And with money in permanently short supply, even the sceptics had food for thought. The Wende, or turning point – the fall of the Iron Curtain and the subsequent reunification of Germany – created awareness that the production of goods and services is potentially exposed not only to market failures, but also to failures of the state. The privatization of the former East German state economy gave cause to think about Western state undertakings too.

The grey telephone with a dial disk ultimately became a symbol of technological underdevelopment. While elsewhere cordless phones with keypads were in common use, the Deutsche Bundespost insisted that only these grey phones should be used. Anything else might harm the network. It seemed as if Germany would sleep through the technical revolution in telecommunications. The changeover from a bureaucracy to a business enterprise and the advent of new mobile telephony open to competition were intended to avert this danger.

The issues here first addressed are the subject of discussion to this day. The conversion of state undertakings and authorities into private enterprises is justified by the statement that privatization spares the public purse: costs are cut and the quality of service improved. Finance ministers and city treasurers are among the staunchest proponents, their thoughts extending beyond the proceeds of privatization to the elimination of budgetary risk.

It may seem paradoxical that what finance ministers and city treasurers perceive as a risk to their budgets should be regarded by private investors as a profit-making opportunity for which they are willing to pay hard cash. The paradox resolves itself when privatization is accompanied by a significant increase in efficiency. In the past, for example, the German post office regularly reported a deficit. Now it does the same job at a substantial profit. The same applies to railways and privatized hospitals.

Scope for post-privatization increases in efficiency is regularly to be found in the fact that under state control, personnel costs are excessive, production and sales are inefficiently organized and the flexibility to respond to new developments and new

customer requirements is lacking. In the case of both the railways (Deutsche Bahn) and the post office (Deutsche Post), even prior to flotation the job cuts ran into six digits – while services remained the same or were even expanded. To structure this personnel downsizing in a socially acceptable manner was a remarkable achievement. On the other hand, the very fact that it was possible raises the question of why the state-owned railways and post offices – in the West and in the East – employed so many people who were not needed for the services provided.

Following this logic, the benefit of privatization to the national economy lies in the fact that private enterprises make more economical and expedient use of the labor and capital resources which the economy has available to it. As a result, their productivity increases, which, in turn, facilitates an improvement in living standards. This is ultimately nothing other than an argument that a market system of private enterprise is superior to other economic organizational forms. What, however, has become of all the past concerns, which once ensured that such activities were not exposed to the whims of the marketplace? I shall look more closely at some of these concerns in the following.

2. THE MONOPOLY PROBLEM OF NETWORK INDUSTRIES

The huge telecommunications, energy distribution and railway networks are generally regarded as “natural monopolies”. It does not make economic sense to create such networks more than once. The proprietors of these networks therefore have monopoly powers. In the past, the need to protect consumers from such monopolies was cited in justification for state control over these sectors. Other interests also played a role, such as that of the military in telecommunications and the railways, as well as the desire to ensure a nationwide equality of service.

The monopoly problem still persists. In individual industries it has been reduced now, so that users can avail themselves of alternate networks. For example, the penetration of mobile telephony has markedly offset the monopoly position of the fixed network. The position of power enjoyed by the railways is limited by intermodal competition, that is to say, the alternate choice of road or rail transport. In the energy sector, however, the distribution networks of local and regional electricity and gas suppliers still provide a basis for substantial monopolistic power, as do the transmission and transport networks of the power generators and gas importers/distributors.

In the past, the monopoly problem applied not just to the network, but also to the various services provided via that network – telephone calls, power and gas supplies, rail travel and transport. However, these services are not natural monopolies. There is no reason why they should be offered by one company only, except where the owner of the network refuses to allow others to use it. The latter situation was once commonplace and, to some extent, even upheld by state regulation in protection of vertically integrated monopolies.

IN THE PAST, THE MONOPOLY PROBLEM APPLIED NOT JUST TO THE NETWORK, BUT ALSO TO THE VARIOUS SERVICES PROVIDED VIA THAT NETWORK.



However the experiences of the USA and Great Britain have shown that competition from other companies in the provision of these services markedly improves the market situation for customers, ensuring lower prices and better quality. The reorientation of network industries since the mid 1990s therefore foresees network owners affording other companies the opportunity to offer services of their own and to use the network for that purpose.

In Germany this model has been a great success in the field of telecommunications. The deregulation of these markets has caused prices to tumble and has noticeably improved the quality of life for those who are reliant on telecoms. In the energy sector, however, electricity price cuts were only short-lived. In the medium term, there has been further concentration and price hikes, first in network charges and then from 2001 in power costs as well.

The difference between the two sectors can above all be explained by the fact that access to the telecommunications network was, from the very beginning, clearly defined by law; in addition, the regulatory authority responsible for telecommunication and postal services had direct control over access charges. In the energy sector such regulation was lacking until

2005. Until then network owners were able to use inflated charges for the use of the network to minimize competition in the provision of electricity supplies.

A comparison between different countries reveals that unwinding the monopoly positions of service providers who use these networks has been successful mainly where networks and services are materially separated from one another. There is then no incentive for network owners to use their hold over the network to obstruct other companies and thereby extend their monopoly from the network to the provision of services. Based on these findings, the German Monopolies Commission proposed in 2002 that, in the case of Deutsche Bahn AG, there should be a material separation between the rail network and railway operations. Since Deutsche Bahn AG is still wholly owned by the state, such a requirement would not conflict with the protection of private property enshrined in the German Constitution; whereas in the energy sector, for which a similar proposal was recently mooted by the European Commission, the companies are to a substantial extent in private ownership. A state-imposed separation between networks and operation would therefore meet with constitutional objections.

To summarize, the monopoly problem with network industries still persists. There are hopes that it can be controlled by compelling networks to be opened up to other companies. This, in turn, presupposes effective regulatory control over access. In particular, such regulatory control must extend to access charges and prevent overcharging. Moreover, the regulator must attempt, as far as possible, to exclude hindrances at the level of quality, timeliness and the reliability of access services.



UNWINDING THE MONOPOLY POSITIONS OF SERVICE PROVIDERS WHO USE THESE NETWORKS HAS BEEN SUCCESSFUL MAINLY WHERE NETWORKS AND SERVICES ARE MATERIALLY SEPARATED FROM ONE ANOTHER.

3. NETWORKS AS COLLECTIVE GOODS

On the other hand, just when are network access charges excessive? Regulatory pricing control raises legal, as well as conceptual problems. The obligation to grant other companies access to a network at officially controlled prices presupposes that even after privatization the network is to be regarded as common property. In how far is that compatible with the protection of private property assured by the constitution? How can it be ensured that private-enterprise network companies still have an incentive to invest in their networks? What rate of return do they require for doing so?

The above questions sound complicated, but in conceptual terms at least they have largely been answered. On the other hand, there are as yet no conceptual solutions to the questions that arise when a network cannot be funded through private enterprise, but is instead dependent on subsidies from the public purse.

Such is the case with the railways. Whereas telecommunications and energy distribution networks are financed out of the proceeds for the use of the network, the rail network is reliant on state subsidies. Increasing the charges for network services, that is to say, for the transport services provided via the network, would simply drive even more traffic off the rails and onto the roads or into the air. Rail traffic would be dramatically curtailed. Whether the rail system would thereafter be financially self-supporting is an open question. Certainly, it would no longer correspond with what the wider community expects of it. In accordance with Article 87e of the German constitution, the federal government must guarantee that the development and maintenance of the rail network takes due account of the welfare of the general public. In fulfilment of this duty, the Federal government each year pays subsidies to the railway to fund network construction costs. In the eleven years following the reform of the railways in 1994, these subsidies totaled some EUR 38.4 billion. For the future, an annual sum has been earmarked in the amount of EUR 2.5 billion. Without these subsidies, the Deutsche Bahn AG would regularly find itself reporting a negative return on equity. Selling off the business on the stock market would be unthinkable.

The view that, in the not too distant future, the Deutsche Bahn AG ought to be in a position as an integrated undertaking comprising both network and operations to generate the positive return on equity expected by private investors presupposes that the company can depend on Federal government subsidies continuing to flow. In other words, bringing the integrated

business to the stock market would mean selling private investors an assurance of future government cash. That assurance is only likely to be accepted provided that the subsidies are fixed by contract or by law in such a way that there is no chance of the government ridding itself of this obligation post-flotation.

Just how are these funds spent? Under the terms of the constitution, they should be used in the service of the general public. However, as a business enterprise, the Deutsche Bahn AG has interests of its own to serve. Therefore, there are demands on the part of the company that operational exigencies should be sole criterion, which brushes aside the fact these government subsidies originate from tax payers who expect in return that the general public's needs should be accommodated. One may dispute the extent to which the state should hand out money, for example to accommodate regional policy concerns over the alignment of new rail routes. However, when the state dispenses cash, it should also be given the opportunity to have a voice in how the money is spent and to assert the interests of the wider community. This leads to an irreconcilable conflict. If the Federal government has a say in how its construction cost subsidies are spent, it can also put a block on certain uses for these funds. In which case there is a question mark over the dependability of funding in general.

Advocates of an integrated flotation suggest that the level of construction cost subsidies and the use thereof should be defined in a ten-year service level and financing agreement. If it were possible, in such an agreement, to settle everything that has to be settled, further discussion would be redundant. However, the fact is, contracts never settle everything. Time and again developments occur that were unforeseeable when the contract was signed, and for which no contractual provision has therefore been made. It is then a question of who is responsible for the decisions to be taken. Normally, this would be the owner – this role assignment is a function of the legal institution of ownership. For the other parties involved, this presents a risk. They can try to resolve this governance problem by exercising their contractual rights of codetermination. However, this would simply transfer the risk of opportunistic behaviour from one contracting party to another.

This conflict epitomizes the privatization of collective goods which are not economically self-supporting. Privatization means the transfer of ownership to persons or business undertakings that pursue their own interests. This normally also entails the transfer of economic responsibility and liability. If,

however, the state continues to answer for the costs, the transfer of liability remains piecemeal. Attempting to effect privatization without relieving the state of its financial responsibility is like trying to square the circle.

ATTEMPTING TO EFFECT PRIVATIZATION WITHOUT
RELIEVING THE STATE OF ITS FINANCIAL RESPONSIBILITY
IS LIKE TRYING TO SQUARE THE CIRCLE.



4. CONFLICTS OF INTEREST ON THE PART OF THE STATE

The privatization of network industries raises other problems of governance as well: the state plays many roles. Firstly, it is the sovereign duty of the state to regulate access. In the case of the railways, the state is also responsible for the network. Where the state retains shares in the relevant undertaking, it has a joint stake in the success of the private enterprise. And lastly, the state is also a customer, as for example when the Federal states "buy in" specific rail services to-order to provide local passenger transport.

This variety of roles creates a number of conflicts of interest. Responsibility for regulating access as a basis for effective competition in downstream markets contrasts sharply with the interest of the state as shareholder in the profits of the monopoly undertaking. Whereas the profit-oriented interest of the shareholder contrasts with the customer's interest in low-cost services. Likewise, the shareholder's interest also contrasts with the interest of the finance minister in restricting subsidies. These conflicts are largely resolved when the undertaking overall is financially self-supporting and is privatized entirely with no further state participation. The state is then left solely with the task of regulation. This is difficult enough, but is not in itself encumbered by conflicts of interest.

Things look different when the undertaking is not self-supporting and the state retains responsibility for the network as common property. In the case of the railways, the German Constitution requires the Federal government to retain a minimum 51 % of the undertaking that owns the network. Given this controlling majority, the state must, on the one hand, fulfil

its responsibility for the infrastructure, and, on the other, comply with the duties of a majority shareholder as defined in company law. This dual function as guardian of the public interest and governing body of a listed company blurs the demarcation of competences and makes it all the harder to attribute responsibility. Private investors are bound to fear that the government will use its majority to enforce decisions at their expense, for example by blocking dividends, in order to keep back funds for investment in the railway infrastructure. This conflict of interest could be avoided only if the transportation business and the network were to be completely separate and the government were to sell its interest in the transportation side.

On the other hand, another conflict of interest would then be unavoidable. Since the rail network is partially financed through government subsidies, access charges cannot be fixed as in the case of other network industries simply by considering the cost of the efficient provision of service. The idea that track prices should present an adequate return on capital employed in consideration of risk would conflict with the fact that government subsidies are needed. The concern that lower track prices should lead to greater competition and more efficient use of the infrastructure contrasts starkly with the desire to limit the need for network subsidies by keeping track prices high.



THE COMMON CONCERNS THAT ORIGINALLY LED TO THE STATE ASSUMING THESE TASKS STILL REMAIN RELEVANT. TO NEGLECT THESE COMMON CONCERNS ENTAILS THE POTENTIAL RISK OF FUTURE ABERRATION.

The privatization of activities once incumbent on the state regularly leads to drastic reductions in requisite costs. However, the common concerns that originally led to the state assuming these tasks still remain relevant. To neglect these common concerns entails the potential risk of future aberration. For scientists and politicians alike, it is a question of finding governance mechanisms which will ensure that the relevant tasks are efficiently performed while still taking due account of the concerns of the wider community.

LITERATURE

M.F. Hellwig, The Provision and Pricing of Excludable Public Goods, Ramsey-Boiteux Pricing versus Bundling, *Journal of Public Economics* 91 (2007), 511 – 540.

M.F. Hellwig, Stellungnahme bei der Öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages zur Privatisierung der Deutschen Bahn AG am 10. Mai 2006. [Commentary on the public hearing of the Bundestag Committee on Transport, Building and Housing into the privatization of Deutsche Bahn AG on May 10, 2006]

1] For a general overview see: http://www.coll.mpg.de/pdf_dat/ReportCI.pdf and http://www.coll.mpg.de/pdf_dat/ReportCIII.pdf

2] It remains controversial whether the delivery network of the post is to be classified in the same way as the physical networks mentioned here.

3] The raising of electricity tariffs from 2001 to 2003 can mainly be attributed to an increased concentration, whereas the raised electricity tariffs since then are caused by the raising of the prices for primary energy and the introduction of CO₂ certificates.

4] For comparison: The turnover of the Deutsche Bahn AG lay on a scale of 15 Bn. EUR without acquisitions of non-rail-logistic enterprises; the commercial results in each case lay within the 3-figure million area.

5] Yet, public house holds also benefit from low route prices because an increased competition in the railway business lowers the costs, which the Federal states invest in passenger transport.