

Chemie: auf zu neuen Zielen – Gedanken zur Zukunft der Chemie**

George M. Whitesides*

Stichwörter:

Genomforschung · Wissenschaftsethik ·
Wissenschaftstheorie · Zukunftsforschung

„Wenn ein angesehener, aber schon älterer Wissenschaftler feststellt, dass etwas möglich ist, hat er meistens Recht; wenn er feststellt, dass etwas unmöglich ist, hat er sehr wahrscheinlich Unrecht.“

Arthur C. Clarke

Versuchungen und Risiken bei der Vorhersage der Zukunft

Das Spekulieren über die Zukunft der Wissenschaft scheint den Wissenschaftlern im Blut zu liegen. Wir alle tun es. Und wir glauben fest daran, dass ernsthafte Vorhersagen fast immer falsch sind. Ist das Nachdenken über die Zukunft also etwas Wichtiges oder dient es der bloßen Zerstreuung – wie Tagträumen, Gärtnern oder Lotteriespielen? Warum verbringen wir unsere Zeit damit, Mutmaßungen über Dinge anzustellen, die wir nach unserer eigenen Überzeugung nicht vorhersagen können?

Dafür gibt es mindestens fünf Gründe. Der erste ist rein praktischer Natur: Wir planen unsere Arbeit. Über die Zukunft nachzudenken gehört dazu, wenn wir unsere Forschungsthemen aus-

wählen. Wir, die wir mit der Naturwissenschaft leben, sagen uns, dass es die Genugtuung über ein gelöstes Problem ist oder der Nervenkitzel bei einer Entdeckung, die uns antreiben; weniger wohlmeinend vermuten Soziologen, dass wir unsere Arbeit tun, um unseren Lebensunterhalt zu verdienen und um beruflich voranzukommen. Die Wahrheit ist wohl, dass beides zusammenspielt. Gute Probleme zu finden – Probleme, die neue Facetten hervorbringen und die den Lauf der Welt an irgendeiner Stelle verändern – ist intellektuell befriedigend und auch beruflich lohnend.

Der zweite Grund ist, dass wir unsere Neugierde stillen wollen. Wir rätseln über die Welt der Zukunft. Welche kleinen Helferlein werden *diese* Welt am Laufen halten? Welche unserer Fantasien werden für unsere Enkel Realität sein?

Der dritte Grund ist philosophischer Natur. Wissenschaft und Technik sind Grundbestandteile unserer heutigen Kultur und werden wahrscheinlich mehr als andere Bestandteile (Materialismus, religiöser Fundamentalismus, Kapitalismus...) das Leben jedes einzelnen und die Gesellschaft verändern. Wir wollen wissen, welches die *großen* Veränderungen sein werden und welche Rolle die Naturwissenschaft dabei spielt.

Der vierte Grund ist, dass die Gesellschaft von uns *erwartet*, dass wir spekulieren. Wir sind Teil ihres „Frühwarnsystems“ für Veränderungen.

Der fünfte Grund schließlich ist, dass wir eine unbequeme Frage beantworten müssen: „Gibt es Forschung, die wir *nicht* betreiben sollten?“ Wir Naturwissenschaftler haben uns im Allgemeinen in einem Gefühl der moralischen

Neugierde eingerichtet. Wir müssen uns fragen, ob es Forschung gibt – fürderhin technisch machbar und wissenschaftlich interessant –, auf die wir aus ethischen Gründen verzichten sollten. Gibt es Fragen, die wir nicht stellen wollen, weil wir die Antworten unter keinen Umständen wissen wollen?

Wissenschaft ist eine Mischung aus Gewöhnlichem und Außergewöhnlichem

Ist die Zukunft der Wissenschaft tatsächlich so unvorhersagbar? Die Antwort lautet „jein“. Wissenschaft ist eine Mischung aus einem großen Anteil an leicht vorhersagbarem „Gewöhnlichem“ und einem kleinen Anteil an ziemlich unvorhersagbarem „Außergewöhnlichem“. Der Teil der Wissenschaft, der gewöhnlich ist – das Tagesgeschäft: nützliche, wichtige, vertraute Wissenschaft –, kann oft mit vernünftiger Genauigkeit in die Zukunft extrapoliert werden. Es ist die *außergewöhnliche* Wissenschaft mit ihren Überraschungen, die wir nicht vorhersagen können; es ist der Teil der Wissenschaft, der Spekulationen über die Zukunft ihren (wohlverdient) schlechten Ruf verschafft. Die Überraschungen sind es aber auch, die die Wissenschaft so enorm spannend machen und die Lebensumstände unserer Enkelkinder – ob zum Besseren oder zum Schlechteren – völlig verändern können.

Dass sie eine endlose Folge von Überraschungen hervorbringt, ist einer der vielen Reize der Naturwissenschaften. Manche zeigen sich langsam und inkrementell, andere kommen anscheinend aus heiterem Himmel. Jeder von

[*] Prof. G. M. Whitesides
Department of Chemistry and
Chemical Biology
Harvard University
12 Oxford Street, Cambridge
MA 02138-2902 (USA)
Fax: (+1) 617-495-9857
E-mail:
gwhitesides@gmwgroup.harvard.edu

[**] Ich danke Michael Mayer, Mila Boncheva und Barbara Whitesides für ihre Diskussionsbeiträge und Hilfe beim Abfassen des Manuskripts.

uns kann zwei Listen von Überraschungen aufstellen: eine mit den persönlichen Favoriten und eine mit Überraschungen, die die Welt verändert haben. Gewöhnlich werden die Listen verschieden sein. Wir mögen das, was wir kennen, und finden kleine Eigenarten der uns vertrauten Wissenschaft liebenswert. Das Anerkennen großer Entdeckungen in uns unbekannten Bereichen erfordert mehr Einsatz.

Als Chemiker war ich sofort begeistert, regelrecht elektrisiert, als ich erfuhr, dass XeF_4 eine stabile Verbindung ist. Von Biologie wusste ich weit weniger, sodass ich Jahre brauchte, um die Entdeckung der Apoptose zu verinnerlichen und mir darüber klar zu werden, wie die Zelle sich zwischen Leben und Tod entscheidet. Nicht alle Überraschungen sind gleichwertig: Xenontetrafluorid gibt einem Chemiker Aufschluss über Prinzipien der chemischen Bindung; die Entdeckung der Apoptose veränderte innerhalb der gesamten Naturwissenschaften das fundamentale Verständnis von „Leben“.

Ein unausgesprochenes Ziel der Wissenschaft ist es, *Veränderungen auszulösen*: etwas zu erfahren oder etwas zu tun, das die Gedanken oder das Verhalten der Menschen verändert. Viele der größten Entdeckungen – die wissenschaftlich wichtigsten und die gesellschaftlich folgenreichsten – waren Überraschungen, und von ihren Folgen hatte man zu der Zeit, als sie gemacht wurden, keine Vorstellung. Wer hätte die gesellschaftlichen Veränderungen vorhersagen wollen, die aus der Klassifizierung der Elemente in ein Periodensystem, aus der Quantenmechanik oder aus dem World Wide Web resultierten? Wer hätte vermuten können, dass das erste NMR-Spektrum von Ethanol in eine Technik münden würde, mit der man dem Gehirn beim Denken zuschauen kann?

Die Unvorhersagbarkeit großer Überraschungen macht uns vorsichtig, Spekulationen anzustellen: Es ist blamabel, sich öffentlich geirrt zu haben, und große Überraschungen lassen uns alle wie Einfaltspinsel dastehen. Eine Wissenschaft frei von Spekulativem wä-

re hingegen trostlos, und wir würden zudem unsere Verantwortung gegenüber der Gesellschaft vernachlässigen, vor Veränderungen zu warnen, auch wenn wir diese womöglich selbst verursachen.

Grundüberzeugungen herausgreifen, keine Vorhersagen treffen

Wenn wir – Wissenschaftler und Laien – über die Zukunft spekulieren, wollen wir vor allem wissen, wie Naturwissenschaft und Technik beschaffen sind, die revolutionäre Umwälzungen verursachen, und ob diese Veränderung gut ist oder schlecht oder beides, ob sie eine Frage des Zusammenhangs ist, der Umstände oder der persönlichen Auffassung.

Vom gegenwärtigen Stand der Naturwissenschaft auszugehen, diesen in die Zukunft zu extrapolieren und dann abzuschätzen, wie die Gesellschaft diese zukünftige Wissenschaft gebrauchen oder missbrauchen wird, ist ein so unsicherer Denkprozess, dass er höchstwahrscheinlich scheitern wird. Ein anderer und vielleicht direkterer Ansatz, um herauszufinden, an welchen Stellen die Naturwissenschaften eine Gesellschaft umformen können, besteht meiner Auffassung nach darin, Bereiche zu identifizieren, in denen Veränderungen *von Bedeutung* wären, und sich dann zu fragen, ob eine *vorstellbare* Wissenschaft diese Veränderungen verursachen könnte.

Wie können wir Bereiche ausmachen, in denen die Gesellschaft angreifbar für Veränderungen ist und eine neue Idee oder eine neue Technologie Etabliertes zum Kippen bringen kann? Ich schlage vor, zunächst die *Grundüberzeugungen* herauszuarbeiten, die in unserer Gesellschaft verankert sind, und dann die Frage nach der Angreifbarkeit dieser Grundüberzeugungen angesichts plausibler naturwissenschaftlicher Konzepte zu stellen.

Eine Grundüberzeugung ist eine Vorstellung, die als gegeben angesehen wird: Sie trennt stillschweigend das Vorstellbare vom nicht Vorstellbaren. Falls eine Grundüberzeugung angreif-

bar ist, ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass sie irgendwann unter den Angriffen der Naturwissenschaften zerbrechen wird – zum Besseren oder zum Schlechteren. Ein Beispiel: Wir sind zutiefst davon überzeugt, die intelligentesten Wesen auf dem Planeten zu sein. Es brächte uns zweifellos aus der Fassung, wenn wir erkennen würden, dass Naturwissenschaft und Technik ein Wesen hervorgebracht hätten, das intelligenter ist als wir: einen ebenbürtigen Rivalen (oder vielleicht einen ebenbürtigen Partner – obwohl wir, als Spezies, noch nie gut im Teilen waren). Wie wahrscheinlich ist es, technisch gesehen, dass die Naturwissenschaft derartiges tun wird? Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, ob man Intelligenz als eine charakteristische Eigenart hoch entwickelter lebender Organismen (Menschen, Tümmeler, Wale, Schimpansen) auffasst oder als ein zwangsläufig auftretendes (oder technisch erzeugbares) Merkmal jedes hinreichend komplexen Informationsverarbeitungssystems. Wird also die Informationswissenschaft intelligente Maschinen hervorbringen? (...und was ist überhaupt „Intelligenz“ bei einer Maschine?) Ich weiß es nicht, aber ich weiß auch nicht (und auch andere, kenntnisreichere als ich), dass es unmöglich ist. Dies ist somit ein Gebiet, das wir, und die Gesellschaft, sorgfältig beobachten sollten.

Werfen wir einen Blick auf die Vergangenheit: Wo hat die Naturwissenschaft wichtige Grundauffassungen aufgelöst, mit tiefgreifenden Folgen für die Gesellschaft? Widerlegte Auffassungen lassen sich rückblickend leicht ausmachen: Es sind die Gegebenheiten des täglichen Lebens, die wir als normal hinnehmen, die aber in früheren Zeiten ein „Unmöglich!“ zur Reaktion gehabt hätten. Hätte man Friedrich den Großen oder Sun Tsu gefragt, ob es je möglich sein werde, eine Stadt auf der anderen Seite der Erdkugel mit einem einzigen Schlag völlig zu zerstören, wäre ihre Antwort „Nein!“ gewesen. Für sie, und für ihre Gesellschaften, war diese Einschränkung in der Kriegführung eine Grundüberzeugung. Heute akzeptieren wir wie selbstverständlich eine Welt, in der Wissenschaft und Technik – als Quantenmechanik geboren und ausgewachsen zu nuklear bestückten Interkontinentalraketen (oder vielleicht nur

zu einem Mietlaster, der die voll funktionsfähige Atombombe eines Amateurs verbirgt) – diesen einen Schlag auf besorgniserregende Weise möglich machen. Die Widerlegung dieser Grundüberzeugung hat die Gesellschaft verändert.

Wir haben viele andere Grundüberzeugungen abgelegt, mit guten und bösen Folgen. Ehemals konnte Wissen nur mündlich überliefert werden, und erst das geschriebene Wort und die beweglichen Lettern gaben unserer Gesellschaft ein Langzeitgedächtnis. Ehemals war es unmöglich, über große Entfernungen mit anderen zu sprechen oder sich zu sehen; heute halten, unter anderem, Telefon, Radio, Fernsehen und Web unsere Gesellschaft zusammen. Die Kontrolle über die menschliche Fortpflanzung hat die Rolle der Frau in der Gesellschaft von Grund auf verändert. Die Gesellschaft verändert sich, wenn sie eine zentrale Grundüberzeugung verwirft.

Retrospektive Gedanken zu Grundüberzeugungen sind nicht unbedingt weniger fehlbar als vorwärtsgerichtete Gedanken zu Wissenschaftlichem, aber sie konzentrieren sich meist auf bedeutende gesellschaftliche Probleme und weniger auf kleine technische Fortentwicklungen. Eine Fokussierung auf Grundauffassungen könnte daher ein Frühwarnsystem für bedenkliche Entwicklungen hervorbringen, das wirkungsvoller ist als die Extrapolation bestehender wissenschaftlicher Erkenntnisse. Dieser Ansatz böte außerdem folgende Vorzüge: 1) Es würde sich zeigen, dass die trostlose intellektuelle Vergreisung, die in John Horgans stimulierendem Buch *An den Grenzen des Wissens* suggeriert wird, nicht stattfindet; 2) es würden sich Zukunftsbereiche ausmachen lassen, in denen die Naturwissenschaften einen starken Einfluss hätten; 3) es würden besonders interessante Probleme aufgezeigt, an denen Naturwissenschaftler arbeiten könnten; 4) es würden neue Ansätze aufgezeigt: Große Probleme kennen keine Grenzen zwischen den Disziplinen – akademische Fachbereiche schon.

Im Folgenden werde ich neun Grundüberzeugungen abhandeln, von

denen ich glaube, dass sie fundamental für die westliche Gesellschaft sind und anfällig gegen eine wissenschaftliche Widerlegung. Diese Liste ist völlig subjektiv, und andere würden andere Listen erstellen. Die Grundüberzeugungen sind gänzlich verschiedenen Typs: manche sind konzeptioneller, andere praktischer und wieder andere soziologischer Natur.

Wo fügt sich die Chemie ein?

Die Chemie hat über zwei Jahrhunderte eine wunderbare Zeit durchlebt und dabei unser Verständnis von der physischen Welt revolutioniert. Sie klärte die atomare und molekulare Struktur der Materie auf und brachte Erfindungen hervor – Medikamente, Kleidung,

Treibstoffe, Waffen, Materialien –, die die Gesellschaft veränderten. Noch immer gibt es viel über Moleküle, Bindungen und Reaktivitäten zu lernen, allerdings unterscheidet sich dieser Typ Forschung grundlegend

von Themen wie Altersforschung und Maschinenintelligenz und ist eher evolutionär als revolutionär. Finden die *revolutionären* Entdeckungen heute anderswo statt oder sind noch immer chemische Entdeckungen zu machen, die so grundlegend sind wie die Gesetze der Thermodynamik, die Natur der chemischen Bindung oder die molekulare Basis der Vererbung?

Jede Antwort auf diese Frage ist abhängig von der persönlichen Einstellung und von der Definition des Begriffs „Chemie“. Ist es fundamental, den Ursprung des Lebens zu verstehen oder die molekulare Basis von Empfindungen? Für mich ist es das. Handelt es sich hier um „Chemie“? Für mich tut es das. Ist es fundamental, Komplexität zu verstehen (was immer „Komplexität“ bedeutet) oder nichtlebende Intelligenz zu entwickeln? Ja, und beides hat wichtige chemische Aspekte. Ist es fundamental, Hybride aus lebenden und nichtlebenden Systemen zu erzeugen? Natürlich, und die Chemie kann hier vieles beitragen.

Dieser Essay befasst sich mit den Grundauffassungen, die in unserer Ge-

sellschaft akzeptiert sind, und vom Potenzial der Naturwissenschaften, diese Auffassungen beiseite zu wischen. Es geht hier nicht speziell um Chemie. Ich bin davon überzeugt, dass Chemie überall sein kann, sofern Chemiker bereit sind, sich auch überall einzusetzen, oder aber, so wir dazu nicht bereit sind, sich zu einem unsichtbaren Teil der technischen Infrastruktur reduziert. Die Chemie war stets fast blind reduktionistisch. Mir wird immer wieder gewahr, dass „Chemiker sich mit Molekülen befassen“, als ob jede andere Tätigkeit suspekt wäre. Natürlich befassen sich Chemiker mit Molekülen – sie *sollen* es auch; ihr Interesse soll aber auch dem *Nutzen* von Molekülen gelten sowie Problemen, für die Moleküle nur ein Teil der Lösung sind. Wenn Chemiker sich aus den Bereich der Moleküle hinausbewegen und das *gesamte* Problem erfassen – vom Design von Detergentien hin zur Synthese von Kolloiden hin zu Kontrastmitteln für die Kernspintomographie hin zu Trajektorien von Zellen im Embryo bis hin zu den Anwendungen regenerativer Medizin –, dann wird es auch zwangsläufig zu einem lebendigen Austausch von Ideen, Problemen und Lösungen zwischen Chemie und Gesellschaft kommen.

Die Chemie hat das technische Fundament gelegt, auf dem viele Entdeckungen der Biologie, der Mikroelektronik oder der Hirnforschung (oder, wenn wir schon dabei sind, der Planetenerkundung) aufbauen. Es gäbe keine Genomforschung ohne chemische Methoden zur Trennung von DNA-Bruchstücken, zur Synthese von Primern und Sonden und zur Auftrennung von Restriktionsendonucleasen in einzelne, definierte Aktivitäten. Es gäbe keine nuklearen Interkontinentalraketen ohne Methoden zur Anreicherung von Plutonium und Uran und zur Herstellung von Explosionslinsen. Es gäbe keine medizinischen Wirkstoffe ohne chemische Synthese und Massenspektrometrie. Es gäbe keine interplanetarischen Sonden ohne Treibstoffe und Raketentriebwerke und Silicium-Einkristalle.

Dies sind Beispiele aus der Vergangenheit. Doch wie sieht die Zukunft aus? Die Chemie ist – noch immer – allgegenwärtig: Sie *muss* es sein! Denn die Chemie ist die Wissenschaft von der

realen Welt. Will sie aber weiter die Hauptrolle geben und nicht zum Bühnenarbeiter degradiert werden, muss sie sich neuen Problemen öffnen. Es ist nicht möglich, die Dauer menschlichen Lebens zu verlängern, ohne die Moleküle des Organismus zu manipulieren, um das Problem aber zu verstehen, braucht es mehr als die Manipulation von Molekülen. Eine Kommunikation zwischen lebenden und nichtlebenden Systemen erfordert die Entwicklung einer molekularen Schnittstelle, der Entwurf dieser Schnittstelle kann aber wiederum nur gelingen, wenn die Natur von „Information“ in Organismen und Computern verstanden ist und man zwischen beiden übersetzen kann. Eine Gesellschaft, die die Informationstechnologie nutzt, um alle ihre Teilbereiche zu verflechten, benötigt neue Systeme zur Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Energie – Batterien werden aber nur ein Teil dieses Systems sein.

Die Chemie war stets die „unsichtbare Hand“, die die Werkzeuge aufbaut und betätigt und die Infrastruktur aufrechterhält. Sie kann aber mehr sein. Wir halten uns für Fachleute im Herausbrechen von Steinblöcken aus Granit; wir haben aber nie daran gedacht, Kathedralen daraus zu bauen. Wir haben die Wahl, ob wir uns auf die Moleküle, die Materialien und Werkzeuge konzentrieren, die den Beginn einer Entdeckung einleiten, oder ob wir unser besonderes, einzigartiges Begriffsbild einbringen, um ein Problem zum Abschluss zu bringen.

Ich glaube, dass alles, vom Methan bis zur Empfindung, Chemie ist und dass wir unsere eigenen Auffassungen bezüglich der Grenzen unseres Arbeitsgebietes neu überprüfen sollten. Überprüfen wir nun einige verbreitete Auffassungen, und sehen wir, was wir daraus lernen können.

Grundüberzeugungen

1. Wir sind sterblich

Wir sind davon überzeugt, sterblich zu sein: Wir werden sterben. Wir wissen das aus Erfahrung, wenn auch nur aus der Erfahrung anderer. Aber woran werden wir sterben? Vor hundert Jahren waren Infektionskrankheiten eine

Haupttodesursache; heute ist dies ein eher untergeordnetes Problem. Die meisten von uns werden an Herz-Kreislauf-Erkrankungen, an Krebs, der Alzheimerkrankheit, Diabetes, an degenerativen Krankheiten sterben. Unabhängig von den Details sterben wir, wenn wir alt werden.

Wir wissen aber, dass manche Zellen anders altern als andere. Transformierte Zellen sind in gewissem Sinne unsterblich (wenngleich sie kein Organismus sind); einzellige Organismen, die sich durch Teilung fortpflanzen, haben ebenfalls eine Art von Unsterblichkeit. Es gibt Strategien, die das Leben deutlich verlängern: Fasten hat diese Wirkung bei Mäusen und Fruchtfliegen und wahrscheinlich auch beim Menschen. Die Erbanlagen spielen mit Sicherheit eine wichtige Rolle.

Die Molekularbiologie hat damit begonnen, jedes unserer Gebrechen zu erforschen und das passende Heilmittel vorzuschlagen. Herz-Kreislauf-Erkrankungen treten die Nachfolge der Infektionskrankheiten an: Die kombinierte Verabreichung von Medikamenten zur Regulierung des Blutdrucks, des Cholesterinspiegels und der Blutgerinnung verringert die Mortalität infolge von Herz-Kreislauf-Erkrankungen; je früher diese Behandlung begonnen wird, möglichst schon bevor sich eine Schädigung manifestiert, desto größer sind die Erfolgsaussichten. Wenn wir die Rolle der freien Radikale bei der Schädigung von Gewebe verstehen, können wir die Folgen eines Infarktes besser eindämmen. Infektionskrankheiten spielen vielleicht auch eine wichtige Rolle bei der Schädigung der Intima der Blutgefäße und könnten daher Mitauslöser für die Bildung von Ablagerungen an der Gefäßwand sein. Änderungen im Lebenswandel – weniger fettes und rotes Fleisch, weniger Zigaretten – tragen dazu bei, Schädigungen einzuschränken. Viele der Ursachen für Herz-Kreislauf-Erkrankungen erscheinen leicht nachvollziehbar und im Prinzip kontrollierbar. Minimieren wir diese Ursachen, und wenn die medizinischen Strategien am Ende versagen, ersetzen wir das nicht mehr funktionierende Organ durch das eines Schweins, das so gezüchtet wurde, dass es immunologisch dem Menschen ähnelt, oder regenerieren wir das Organ komplett! Es scheint

eine realistische Möglichkeit zu geben, dass Herz-Kreislauf-Erkrankungen – momentan die weltweit häufigste Todesursache – einmal keinen bedeutenden Beitrag zur Sterblichkeitsziffer mehr leisten werden.

Wenn Herz-Kreislauf-Erkrankungen keine Bedeutung mehr hätten, würden andere Krankheiten in den Mittelpunkt rücken. Krebs ist die nächste Krankheit in der Reihe, und Krebs bedeutet ein weitaus schwierigeres Problem. Die großen Fortschritte in der Tumorbologie haben zumindest deutlich gemacht, wie kompliziert Krebs ist. Krebs ist im Prinzip eine sich anhäufende Unordnung des Genoms innerhalb einer Zellpopulation. Sobald die Krankheit nachweisbar ist, sind Genom und Chromosomen meist schon erheblich geschädigt. Je mehr wir über die molekularen Ursachen von Krebs erfahren, umso mehr begreifen wir, warum sich Fortschritte in der Tumorthherapie nur zögerlich einstellen.

Die Genomforschung wurde bisher in erster Linie zur Aufklärung von Krankheitsursachen eingesetzt, weniger zu deren Behandlung; hier bieten sich viele Optionen für die Zukunft. Es gibt viele Genomdefekte, die unterschiedlichen Krebsarten gemeinsam sind: Schäden in Signaltransduktionswegen, die den Zellzyklus steuern; Versagen der Prozesse, die das Gen auf Schäden überprüfen und die geschädigten Zellen zum programmierten Zelltod (Apoptose) führen; Versagen der Stoffwechselwege, die verhindern, dass Zellen ihren Bestimmungsort verlassen und andere Organe kolonisieren. Wenn wir die Rolle der Telomere verstehen (Telomere sind chromosomale Strukturelemente, die das Zellalter anzeigen, da sie bei jeder Zellteilung verkürzt werden) und eine Möglichkeit fänden, diese innere Uhr zurückzusetzen, hätte dies tiefgreifende Folgen. Alle neuen Ansätze zur Tumorthherapie – Blockieren von Faktoren, die für die Metastase essenziell sind, Verhinderung der Tumorumgebung, Entwicklung von tumorzell-spezifischen Viren – beruhen auf Eingriffen in Regulationssysteme. Andere Strategien werden dazukommen, und einige werden sich bewähren. Das gerade entstehende Gebiet der Systembiologie wird helfen, diese Strategien zu koordinieren.

Bei Krebs (und wohl auch bei den meisten anderen Krankheiten) dürfte Vorsorge (oder Früherkennung) wichtiger sein als Therapie. Einflüsse zu vermeiden, die genetische Schäden verursachen – am naheliegendsten spezielle Verbindungen in der Umwelt oder der Nahrung (besonders im Tabakrauch), die mit DNA reagieren, UV-Licht oder ionisierende Strahlung –, ist sicher die kosteneffektivste Methode zur Risikoverringerung.

Im Kampf gegen den Krebs ist sicher noch lange kein Ende in Sicht, selbst Prävention und Behandlung stehen noch am Anfang. Aber wir verstehen sehr gut die molekularen Zusammenhänge dieser Krankheit, und wir ziehen daraus Ansätze für die Therapie.

Nach dem Krebs kommen die Alterserkrankungen. Diese sind im Detail noch weniger verstanden als Krebs. Meist haben wir nur schwache Hinweise auf die Bedeutung möglicher Faktoren wie genetische Veranlagung, Infektionen, Umwelteinflüsse und Genprogrammierung. Eine Vielzahl an Studien über menschliche und nichtmenschliche Genome wird uns aber eine Flut an Informationen liefern; wir können viele Infektionskrankheiten und Umwelteinflüsse kontrollieren; wir werden in der Lage sein, biologische Uhren zurückzustellen und genetische Fehlfunktionen zu beheben. Wir sehen erste breit angelegte Strategien im Kampf gegen Alterserkrankungen, haben aber noch keine Vorstellung von effizienten Taktiken.

Änderungen im Verständnis von Krankheiten und Alterungsprozessen, und auch von medizinischen Behandlungsmethoden, versprechen keine Unsterblichkeit. Sie führen aber erstmals zur Herausbildung einer echten molekularen Wissenschaft von den Krankheiten und der Medizin. Der Wechsel von der Inkenntnisnahme zur Einsicht und von der Reaktion zur Antizipation bildet die Basis für eine Revolution des Gesundheitswesens. Wenn sich diese Revolution erst einmal entfaltet, hat sie das Potenzial, die Gesellschaft umzuwandeln.

Es braucht keine Unsterblichkeit, um die Welt zu verändern; es reicht schon viel weniger. Wie würden unsere sozialen Einrichtungen funktionieren, wenn die durchschnittliche Lebenserwartung auf 200 und mehr Jahre an-

stiege? Was geschähe, wenn der Zeitabschnitt der weiblichen Fertilität bei 100 Jahren läge? Wie würden wir uns verhalten, wenn die Lebenserwartung um einen Faktor fünf verlängert werden könnte, aber nur wenige Reiche sich dies leisten könnten? Wie würde sich die Welt verändern, wenn der Unterschied in der Lebenserwartung zwischen Erster und Dritter Welt den Faktor zehn ausmachen würde?

Die Chemie sitzt am Kern der biomedizinischen Entwicklung. Die Chemie bringt Wirkstoffe und Impfstoffe hervor. Die Chemie bringt analytische Systeme hervor, die eine detaillierte Genomanalyse von Einzelindividuen ermöglichen werden. Die Chemie erklärt die molekularen Veränderungen, die mit Krankheit und Alter einhergehen. Die Chemie identifiziert (und erzeugt manchmal) die Umweltfaktoren, die biologische Schäden verursachen. Was die Chemie heute *nicht* leistet, ist, molekulare Charakteristika zu zellulärem und organismischem Verhalten zusammenzufügen – etwa so wie im Pointrismus aus einzelnen Punkten ein Bild entsteht. Molekülchemie, Molekülbio-logie und Medizin widmen sich im Grunde doch dem gleichen Thema: die Rolle von Molekülen zu verstehen, die wichtig für das Leben sind, und der Anwendung der Ergebnisse zur Verbesserung unserer Gesundheit.

2. Nur Lebewesen denken, und wir sind die besten Denker

Wir sind, zumindest nach unserer eigenen Auffassung, die Krone der Schöpfung: die intelligenteste und vielseitigste aller Spezies und bekannt für unsere Fähigkeit, andere Spezies zu unterjochen. Wir sind überzeugt, dass diese Position nicht bedroht ist (das Erscheinen von Aliens oder andere unwahrscheinliche Ereignisse außer Acht gelassen).

Werden wir auch weiterhin einzigartig bleiben? Gibt es eine andere Spezies, die so intelligent werden kann wie wir? Es scheint unwahrscheinlich, dass eine andere, uns überlegene intelligente Spezies auftaucht: Die biologischen Evolution verläuft relativ langsam, und einem möglichen Konkurrenten würden wir vermutlich nicht freund-

lich begegnen. Eine Alternative zur unwahrscheinlichen Evolution einer intelligenten Tierart (oder Pflanzenart) ist das Auftauchen einer empfindungsfähigen Spezies auf Silicium- statt auf Kohlenstoffbasis.

Einzelne Computer haben gegenwärtig wohl nicht die nötige Komplexität, um auf unsere Form intelligent zu sein (oder zumindest ihrer selbst bewusst). Je mehr das globale Informationsnetzwerk – das World Wide Web, Kommunikationssysteme großer Bandbreite, universelle Konnektivität – aufgebaut wird (oder sich in zunehmendem Maß selbstorganisiert, um diesen Terminus der Organischen Chemie zu verwenden), wird sich möglicherweise (vielleicht auch bestimmt) eine Komplexität einstellen, die der Komplexität eines menschlichen Individuums gleichkommt oder sie übersteigt. Eine globale vernetzte Einheit, die mit Frequenzen von Petaflops operiert, ist zu Dingen fähig, die wir uns nicht ansatzweise vorstellen können. Warum sollte sie nicht denken? Warum sollte sie nicht über sich nachdenken? Warum sollte sie nicht gar über uns nachdenken?

Die Wahrscheinlichkeit, dass die biologische Evolution eine neue intelligente Spezies hervorbringt, ist durch die langen Generationszeiten komplexer Organismen, durch die Langsamkeit, mit der neue Varianten durch Mutation entstehen, und durch die Komplexität des Zentralnervensystems begrenzt. Evolution und Selektion haben Jahrtausende gebraucht, um uns in unsere gegenwärtige Stellung zu bringen; es müsste wohl besonderer Umstände bedürfen, damit uns andere ihrerseits beiseite schieben. Unsere Intelligenz, unsere Anpassungsfähigkeit und unser Ichbewusstsein (sowie die Entwicklung eines opponierbaren Daumens und eines schräg positionierten Kehlkopfs) haben uns die Fähigkeit gegeben, zu überleben und andere, vielleicht gefährlichere, aber weniger intelligente Lebensformen zu verdrängen.

Computer funktionieren nach anderen Regeln und ohne die Einschränkungen der Biologie. Computerzyklen sind weitaus schneller als die Diffusion von Neurotransmittern über die Synapsen im Gehirn; die evolutionäre Selektion ist sehr viel langsamer als eine adaptive Programmierung. Das Internet sorgt für

eine gewaltige Verflechtung von Computern bei einem sehr schnellen Datenaustausch zwischen den Kommunikationsknoten.

Vielleicht am wichtigsten ist, dass die steigende Komplexität des Web von uns selbst vorangetrieben wird: Die menschliche Rasse – in Form von hunderten oder tausenden von kreativen, tatkräftigen, entschlossenen Menschen – investiert einen bedeutenden Teil ihrer Kreativität in die Entwicklung besserer, möglichst effizient kommunizierender Web-Komponenten, mit dem Ziel, weitgehend überwachungsfrei operierende Systeme zu erhalten. Wir entwickeln Software-Agenten, Applets und autonome Systeme, um die lokale Performance von Computern zu verbessern; was die globale Verknüpfung dieser lokalen Systeme alles mit sich bringt, werden wir erst noch erfahren.

Was die Möglichkeit für ein Auftreten von Empfindung in Computernetzwerken betrifft, können wir zumindest vier interessante Fragen stellen. Die erste Frage betrifft die Beziehungen zwischen Komplexität, Emergenz und Intelligenz. (Der Begriff „Emergenz“ wird hier in dem Sinne verwendet, dass in einem komplexen System Eigenschaften auftreten, die wir nicht aus den Eigenschaften der Einzelkomponenten vorhersagen können.) Wie komplex muss ein System sein, um zu denken? Oder zu empfinden? Können wir – Naturwissenschaftler, und besonders Chemiker, die im Allgemeinen bekennende Reduktionisten sind – komplexes Verhalten auf der Grundlage unserer Kenntnisse über einfache Komponenten vorhersagen? Komplexität zu verstehen war noch nie die Stärke einer reduktionistischen Wissenschaft. Eine zweite Frage betrifft die Mindestvoraussetzungen für „Intelligenz“. Genügen Komplexität sowie Zahl und Dichte von Verknüpfungen, oder hat das menschliche Gehirn etwas Besonderes, das uns auf eine einzigartige Weise intelligent macht? Ich persönlich bezweifle, dass die graue Masse in meinem Schädel etwas Besonderes an sich hat, außer ihrer Komplexität, ihrer dreidimensional verknüpften Struktur und ihrer Fähigkeit, sich durch Erfahrung selbst zu verändern; ich bezweifle, ohne es beweisen zu können, dass das Ichbewusstsein auf subtilen Quantenprozessen be-

ruht. Eine dritte Frage betrifft die Beziehung zwischen Intelligenz und Ichbewusstsein. Gibt es eine Korrelation oder ist Ichbewusstsein gänzlich anders beschaffen als Intelligenz? Die vierte Frage berührt den heiklen Aspekt der Beziehung zwischen Leben und Intelligenz. Wir spekulieren endlos über Evolution in lebenden Systemen und darüber, ob biologische Evolution zwangsläufig zu Intelligenz führt. Was ist mit Intelligenz *ohne* Leben? Ein intelligentes Web wäre in einem von einem Biologen verstandenen Sinne sicher nicht lebendig.

Ichbewusstsein ist wahrscheinlich keine ausschließlich menschliche Eigenschaft, und nicht jeder Homo sapiens ist sich seiner selbst bewusst. Ein Tümmeler oder ein Schimpanse ist sich wahrscheinlich seiner selbst bewusst. Ein menschlicher Fötus sicher nicht; ein Säugling muss sein Ichbewusstsein erst noch entwickeln, und ein Alzheimer-Patient verliert es. Können wir sicher sein, dass ein Computersystem kein Bewusstsein entwickelt? Ich bezweifle es.

Würden wir es überhaupt erkennen, wenn ein zukünftiges World Wide Web ein eigenes Bewusstsein entwickelt hätte? Ich glaube nicht, zumindest eine lange Zeit nicht. Unsere Fähigkeit, uns andere Existenzen als unsere eigene vorzustellen, ist hochgradig eingeschränkt. Die Fähigkeit einer siliciumbasierten Intelligenz – einer Intelligenz, die ein ausgebreitetes Netz dotierter Kristalle und riesenmagnetoresistiver Filme, optischer Fasern und Satellitenrelais bewohnt und durch den Fluss von Photonen und Elektronen „denkt“ –, sich eine Welt aus Wasser, Salzgradienten, Nahrung und Sex vorzustellen, scheint gleichermaßen unwahrscheinlich. Wenn wässrige und siliciumbasierte Intelligenzen einander erkennen würden – der Ausgang wäre kaum vorhersehbar.

Was hat das nun mit Chemie zu tun? Wahrscheinlich alles. Eine der großen intellektuellen Herausforderungen an uns ist, Intelligenz als eine Eigenschaft zu begreifen, die sich aus der Wechselwirkung von Molekülen herausbildet (die, was auch immer sie sind, nicht intelligent sind). Die Chemie ist mit Komplexität vertraut, hat sich aber noch nicht der Aufgabe angenommen, die

Formen komplexen Verhaltens zu verstehen, das große Gruppierungen von Molekülen oder molekular aufgebaute Systeme, z.B. Zellen, entwickeln. Zur Untersuchung von Intelligenz in einem komplexen System ist das Studium unserer eigenen Intelligenz wahrscheinlich der beste Einstieg. Dies ist die beste Vorbereitung, die wir uns gegenwärtig vorstellen können, um einer anderen Intelligenz zu begegnen, auf unserem eigenen Planeten oder anderswo.

Wo liegt die Grenze zwischen lebend und tot?

3. Tiere und Maschinen sind verschieden

Wir neigen zum Kategorisieren. Kategorien, die wir bislang für Unterscheidungen herangezogen haben, sind „belebt“ und „unbelebt“ und „Tier“ und „Maschine“. Ein Tier ist eine biologische Einheit aus Gewebe und Knochen. Es wird von anderen Tieren geboren, lebt und stirbt und hat Merkmale, die aus der Evolution und genetischer Vererbung hervorgegangen sind. In der Vergangenheit haben wir keine Tiere gezielt entworfen, höchstens in einigen Fällen durch Domestizierung und selektive Züchtung auf unsere Bedürfnisse hin verändert. Da Tiere wie wir lebendig sind, empfinden wir, in vielen Abstufungen, ethische Verantwortung ihnen gegenüber.

Eine Maschine ist etwas qualitativ anderes: ein Objekt aus Metall, Keramik und Kunststoff, das wir de novo entwerfen und bauen. Für Maschinen fühlen wir uns ethisch nicht verantwortlich.

Diese zweckmäßige Unterscheidung zwischen Tier und Maschine beginnt auf mehreren Ebenen zu versagen. In einem zutiefst biologischen Sinne entwickeln wir die Fähigkeit, Tiere gezielt zu entwerfen. Rasant entwickeln wir biologische Verfahren, mit denen wir Merkmale von Tieren ähnlich spezifizieren können, wie wir dies mit Maschinen tun. Wir nutzen die Gentechnik bei Tieren zu den gleichen Zwecken wie mechanische Techniken zum Bau von Maschinen. Wir haben Chimären, bei denen Komponenten einer Spezies in einer anderen eingebaut sind; wir können Gene hinzufügen oder entfernen; wir

können ein ganzes Subsystem eines Tieres nachkonstruieren, damit es dem eines anderen gleicht. Wir sehen, wie wir die Oberflächenantigene einer Spezies modifizieren müssen, um ihre Organe für die Übertragung in eine andere Spezies kompatibel zu machen. Wir haben die ersten Schritte getan, um Organe aus Stammzellen zu regenerieren und differenzierte Gewebe zu differenzieren und daraus dann wieder Teile zu regenerieren. Wir entwickeln einen Satz von Methoden, der den maschinenähnlichen Entwurf von Tieren ermöglicht, und wir greifen dabei auf Bauteile zurück, die von Nucleotidsequenzen bis hin zu ganzen Organen reichen.

Die meisten dieser Arbeiten haben natürlich biologische oder biomedizinische Hintergründe. In dem Maße, in dem sich die Möglichkeiten der Biologie erweitern, rücken schnell auch andere Ideen zur Nutzbarmachung von Tieren ins Blickfeld. Tiere als Sensoren einzusetzen – sozusagen als „Kanarienvögel“ –, ist heute plausibel. Pflanzen und Mikroorganismen sind fraglos schon jetzt Alternativen zu chemischen Reaktoren bei manchen chemischen Umwandlungen. Wir wissen, dass selektive Züchtung ungewöhnliche Pflanzen und Tiere hervorbringen kann; die angewandte Biologie kann unsere Fertigkeiten im „Bauen“ von Spezies nur verbessern. Was dieses „Spezies-Engineering“ anbelangt, werden wir uns – müssen wir uns – letztlich auch mit unserer Spezies befassen. Würden wir zu einem Generationen dauernden Raumflug aufbrechen, was würde uns besser wappnen: eine künstliche Gravitation bei unserer gegenwärtigen physischen Form oder eine physische Form, die an niedrige Schwerkraft, hohe Strahlenbelastung und diverse andere Gegebenheiten in unserem Raumschiff angepasst ist?

Radikaler, aber in der Gesamtentwicklung früher einsetzend, sind Versuche, die Welten von Mensch und Maschine zu verschmelzen. Die verfügbare Technologie hält implantierbare Sensoren zur Kontrolle von Herzrhythmus und Blutglucosespiegel bereit. Innenohrimplantate lassen Gehörlose hören. Die Ziele werden immer ehrgeiziger: In Insekten und Ratten implantierte Elektroden können Bewegungen steuern

und Umweltreize vermitteln; Netzhautchips zur Erzeugung von Sehfähigkeit für Blinde; Systeme, die Gedanken direkt in mechanische Bewegungen umwandeln. Ein in ferner Zukunft liegendes Ziel ist die direkte, effiziente Kommunikation zwischen menschlichen Gehirnen und Maschinen.

Diese Ansätze führen zu einem außergewöhnlich komplexen (und womöglich unerreichbaren) zukünftigen Ziel: der Fähigkeit, Gehirn und Computer direkt zu verbinden – d. h., Information, die im Nervensystem eines Organismus fließt, direkt in Information umzuwandeln, die in Form von Elektronen oder Photonen in einem Computer fließt. Die technischen Hindernisse, die einer solchen Fusion von Belebtem und Unbelebtem im Wege stehen, sind immens, aber nicht unüberwindlich; kein fundamentales physikalisches Gesetz wird verletzt werden, um sie zu bewältigen. An einigen Stellen – z. B. bei der Entwicklung von biokompatiblen Schnittstellen – hat sich ein rascher Fortschritt eingestellt; an anderen – z. B. bei der Übertragung von Information zwischen neurologischen und siliciumbasierten Systemen – verläuft die Entwicklung langsam. Geht man allerdings von der unbestreitbaren Tatsache aus, dass sich in Biologie und Informationstechnologie die wissenschaftlichen Revolutionen der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts abgespielt haben, ist es fast sicher, dass das 21. Jahrhundert ihre Überschneidung und Verschmelzung sehen wird.

Wo liegen die größten technischen Probleme? Wir müssen den Code entschlüsseln, mit dem Gehirn und Nervensystem Information übertragen, verarbeiten und interpretieren (den Code, der in Computern benutzt wird, kennen wir bereits, weil wir ihn selbst entwickelt haben); wir müssen lernen, wie wir eine physikalische Schnittstelle zwischen Organismus und Computer zu bauen haben – vielleicht eine zwischen Nerven und Mikroelektroden. Wir müssen lernen, wie wir die Informationsleitung durch Neuronen – Ionengradienten über Membranen und Neurotransmitterpulse in Synapsen – und durch siliciumbasierte Systeme – Elektronen und Photonen – ineinander überführen können. Eine direkte Kommunikation zwischen dem menschlichen Gehirn und

einem Computer wirft auch das wichtige Problem der Dimensionalität auf: Gegenwärtige Computer haben eine intrinsisch zweidimensionale Architektur, Gehirne sind dreidimensional. Bislang haben wir noch keine Lösung für das Problem, genügend viele Neuron-Computer-Konnektoren vom richtigen Typ herzustellen. Ein Ansatz wird vielleicht die Kultivierung von spezialisierten, als Konnektoren fungierenden Nervengewebe sein – was bedeuten würde, Menschen genetisch zu verändern, um sie dem Computer anzupassen.

Mit der Fähigkeit, Hybridsysteme aufzubauen – Systeme, die nicht etwa zwei Typen biologischer Moleküle oder Gewebe enthalten, sondern Systeme aus biologischen und siliciumbasierten Komponenten –, dürfte die Frage, ob sich Computernetzwerke zu empfindenden Einheiten entwickeln könnten, obsolet werden: Vorstellbar wäre demnach eine gemeinsame Entwicklung von Gewebe und Siliciumsystemen, die die Konzepte von „Tier“ und „Maschine“ und von „lebendig“ und „tot“ verschwimmen lässt.

Viele dieser Fragen bergen letztlich auch molekulare Aspekte. Moleküle sind zwar nur ein Teil des Systems, das in Organismen Informationen überträgt und auswertet, aber sowohl der Aufbau von Schnittstellen zwischen belebten und unbelebten Systemen wie auch die Entwicklung von „Übersetzern“ zwischen der Sprache von Ionen und der von Elektronen sind eng mit der Chemie verbunden. Die genetische Manipulation von spezialisiertem Nervengewebe erfordert eine chemische Manipulation des genetischen Materials. Biokompatibilität ist nicht nur ein molekulares, sondern auch ein Materialproblem.

Noch im 21. Jahrhundert wird die Grenze zwischen „lebendig“ und „tot“ neu gezogen werden, und viele der Methoden, auf die man dabei zurückgreifen wird, müssen molekularer Natur sein.

4. Menschliches Leben ist unendlich wertvoll

Die Vorstellung von einem langen, gesunden Leben fügt sich nahtlos zu der Grundüberzeugung westlicher Zivilisationen, dass das Leben unschätzbar

wertvoll ist und seine Verlängerung eine moralische Verpflichtung. Diese Verpflichtung gerät zunehmend in Konflikt mit der Notwendigkeit, medizinische Behandlungskosten einzudämmen, eine Gleichverteilung des Gesundheitsbenefits zu gewährleisten und Bevölkerungsniveaus zu stabilisieren. Wir könnten gezwungen sein, die Wertstellung von Lebensverlängerung an zwei Fronten zu verteidigen:

Erstens: Wir erkennen bereits jetzt, dass es einen Lebensabschnitt gibt, in dem das Leben zwar verlängert werden kann, aber nur unter großem Aufwand und nicht zwangsläufig bei hoher Lebensqualität. Die Möglichkeit z.B., das Leben durch künstliche „Ersatzteile“ (künstliche Gelenke und Organe), Xenotransplantation, Immunsuppression und Organregeneration zu verlängern, könnte für den Patienten ein Leben in ständiger immunologischer Krise bedeuten. Wir können uns vielleicht ein längeres Leben erkaufen, aber nur zu einem hohen Preis und womöglich ohne Qualität. Da die biomedizinische Wissenschaft viele früher tödlich verlaufende Zustände reparieren, aber nicht heilen kann, scheint eine Interessenkollision unvermeidlich.

Zweitens: Die demographischen Konsequenzen einer technisch machbaren Verlängerung von Leben sind gravierend. Ein Balance zwischen Lebensdauer, Geburtenrate und Bevölkerungskontrolle zu erreichen, heißt, schon rein arithmetisch, dass etwas passieren muss: In irgendeiner Form muss es entweder eine Begrenzung der Geburtenrate oder der Lebensdauer geben. Wir könnten uns vor die Wahl gestellt sehen: „Neues Leben oder altes?“. Eine Gleichstellung des Beendens von Leben – also des Tötens von Menschen – mit der Geburtenkontrolle – einer täglichen Begleiterscheinung dessen, was im Amerikanischen als „recreational sex“ geläufig ist – würde einen grundlegenden Wertewandel bedeuten.

Sortieren von Menschen

5. Alle Menschen sind von Geburt an gleich

Eine Grundüberzeugung in vielen westlichen Gesellschaften ist, dass alle

von Geburt an gleich sind: gleiche Rechte vor dem Gesetz, gleiche Chancen. Diese Grundüberzeugung achtet das Individuum, und es hat bislang kein Mittel gegeben – zumindest keines, das wir als gültig akzeptiert hätten –, Ungleichheit zu quantifizieren. Die Genetik hat das Potenzial, diese komfortable Unfähigkeit, angeborene Fähigkeiten zu messen, zu ändern; Erkenntnistheorie und Psychologie werden ebenfalls ihren Teil beitragen.

Wir sehen den Beginn einer Genomanalytik von Individuen. Die ersten vollständigen Karten des menschlichen Genoms werden gegenwärtig noch verfeinert, und die funktionelle Genomik, d.h. das Korrelieren einzelner Gene und Gencluster mit den Merkmalen von Individuen, schreitet voran. Wir wissen nicht, wie kompliziert diese Aufgabe sein wird: Könnten die Merkmale, die uns zu dem machen, was wir sind, durch einzelne Proteine oder relativ einfache Proteincluster bestimmt sein? Könnte die Genomik ein Fenster zu unserem Verhalten und unseren Begabungen öffnen? Wahrscheinlicher ist, dass solche Merkmale das Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels von Faktoren sind, deren Entschlüsselung sehr lange dauern wird. In jedem Fall, auch bei drastischen Verbesserungen der Methoden für die Erfassung und Analyse der biologischen Informationen, wird es Jahrzehnte (aber wohl nicht Jahrhunderte) dauern, bis wir die genetische Struktur mit Stärken und Schwächen von Individuen korrelieren können.

Diesem Unterfangen – der Kartierung von genomischer Information nach Fähigkeiten, Schwächen und Verhalten – steht natürlich ein enormer Nutzen in Aussicht. Es wird ein Fundament für die medizinischen Wissenschaften sein; es wird die Erkennung individueller Schwachstellen für Krankheiten oder Umwelteinflüsse ermöglichen; und es wird uns die Möglichkeit geben, individuelle Stärken zu erkennen und zu trainieren.

Es wird unsere Gesellschaft verändern, sollten wir Genomdaten zur Klassifizierung von Einzelpersonen – insbesondere Kindern – anhand ihrer Fähigkeiten verwenden. Wenn es sehr einfach sein wird, genomische Information über Einzelpersonen zu sammeln, werden wir dann der Versuchung widerstehen kön-

nen, alles über jeden in Erfahrung bringen zu wollen? Nicht nur was vielleicht die Anfälligkeit gegen Lungemphysem durch Rauchen angeht, sondern auch was Stressbewältigung am Arbeitsplatz, im Gefecht oder in der Ehe betrifft? Wie steht es mit der Fähigkeit, gute Eltern zu sein? Zahlungsverpflichtungen rechtzeitig nachzukommen? Humorvoll zu sein? Wir sind auf unverbesserliche Weise neugierig.

Ob zum Guten oder Bösen: Die Chemie spielt eine Schlüsselrolle in diesem Projekt. Die Entwicklung analytischer Systeme, die die schnelle, genaue und preisgünstige Analyse von Einzelgenomen ermöglichen; die eng verflochtenen Bereiche der funktionellen Genomik und der Proteomik, durch die Gene mit Proteinen und Proteine mit biologischer Funktion verknüpft werden; die Wirkung von Umwelteinflüssen – von Nahrungsbestandteilen hin zu Stress und von stressinduzierten Stoffen hin zu Krankheiten oder Funktionsstörungen: All dies hängt von chemischen Methoden zur Untersuchung von Genomik, Proteomik und Stoffwechsel und – letztendlich – zur Sortierung und Klassifizierung von Menschen nach ihren Merkmalen und Fähigkeiten ab.

6. Wir sind Individuen, Persönlichkeit ist wichtig

Wir sind daran gewöhnt, uns selbst als Individuen zu sehen, und als solche schätzen wir die Annehmlichkeiten von Individualität: Entscheidungsfreiheit, Privatsphäre, keine Fremdkontrolle, Selbstbestimmung. Wir sind Individuen, weil wir unserer eigenen Wege gehen; wir behalten unsere Geheimnisse für uns; wir sind für andere unberechenbar.

Individuen sind wir teils durch eigene Entscheidung, teils durch Zufall: Wir können die Gedanken anderer weder lesen noch kontrollieren. Die Revolutionen in der Informationstechnologie und der Genetik bewirken aber, dass detaillierte Informationen über Individuen in solcher Fülle zu beschaffen sind, dass Privatsphäre und Unberechenbarkeit infrage gestellt werden. Viele von uns besitzen Mobiltelefone und andere mikroelektronische Begleiter; dies ist ein Schritt hin zu einer globalen Tech-

nologie, durch die jeder mit jedem weltweit und jederzeit kommunizieren kann. Das Global Positioning System (GPS) und verwandte Systeme erlauben es uns, Positionsbestimmungen vorzunehmen; ein einfacher Transponder erlaubt es anderen, unsere Position zu bestimmen. Eine allgegenwärtige Überwachung – durch Monitore in Gebäuden; durch unbemannte Sonden außerhalb von Gebäuden – wird es eines Tages erlauben, all unsere Tätigkeiten zu erfassen. Eine Historie unseres Verhaltens und unserer Tätigkeiten kann in großen Datenbanken gespeichert werden. Die genetische Analyse ermöglicht die Voraussage von Fähigkeiten, Schwächen und Verhaltensmustern. Soziologie und Psychologie werden, indem sie sich zu Naturwissenschaften entwickeln, dazu beitragen, die Zusammenhänge zwischen Molekülen und Verhalten sowie zwischen Individuen und Gesellschaften aufzuzeigen.

Es mag noch immer unmöglich sein, unsere Gedanken zu lesen. Wenn es aber möglich ist, unsere Aufenthaltsorte und Lebensumstände zu kennen, unsere Tätigkeiten zu überwachen und aufzuzeichnen, unsere Fähigkeiten zu kennen und ständig mit uns zu kommunizieren, wird es auch nicht mehr nötig sein, unsere Gedanken de facto zu lesen: Alle Informationen, die für die Vorhersage unseres Verhaltens erforderlich sind, könnten bereits verfügbar sein.

Viele der Basistechnologien, die erforderlich sind, um unsere Gesellschaft von Individuen in eine Art Ameisenstaat umzuwandeln, sind im Prinzip bereits verfügbar, wenn auch in Form früher Prototypen: GPS, hochkomprimierte Informationsspeicherung, Sensoren für Fernüberwachung, Systeme für genetische Tests. Eine entscheidende Technologie fehlt allerdings noch: tragbare Energiesysteme. Vielleicht entwickeln wir Systeme für eine kabellose Energieversorgung von Gebäuden und Städten; im Freien werden Vorrichtungen für die Erzeugung und Speicherung von Energie benötigt. Sender, die eine ständige elektronische Verbindung aufrechterhalten, brauchen Energie. Batterien auf dem gegenwärtigen Stand der Technik reichen dafür nicht aus: Benötigt wird entweder eine Kohlenwasserstoff-Niedertemperaturbrennstoffzelle oder etwas Exotischeres: vielleicht klei-

ne Kernkraftquellen oder Methoden, um elektrische Energie aus unserem Stoffwechsel zu gewinnen: Das Stück Kuchen zum Dessert könnte vielleicht die Energie für einige weitere Minuten Breitbandkommunikation liefern!

Demokratisierung von Information und Fachwissen

7. Experten kennen sich am besten aus, Ärzte kontrollieren das Gesundheitssystem

Wir sind davon überzeugt, dass das Fachwissen den Experten gehört. Von meinem Automechaniker – einem Experten auf seinem Gebiet – erwarte ich nicht, dass er Diels-Alder-Reaktionen macht. Wir sind abhängig von Fachleuten und ihrer Fähigkeit, ihr Fachwissen zu unserem Nutzen einzusetzen.

Uns interessiert verständlicherweise besonders die Arbeit von Fachleuten im Gesundheitssystem: Wir alle werden krank; und wir alle werden alt. Der Medizinerstand ist der Prototyp einer Gilde – einer, die von hochausgebildeten Fachleuten kontrolliert wird. Diese definieren die Standards, die andere erfüllen müssen, um sich ihnen anschließen zu können. Sie halten auch die Kontrolle über die meisten Aspekte der Medizin: Informationen über Krankheit und Behandlung; Zulassung neuer Wirkstoffe und Behandlungsmethoden; und Zugang zu Wirkstoffen. Obwohl die Körperschaften, die für die medizinische Versorgung aufkommen (Gesundheitskassen, Krankenversicherungen), ein Mitspracherecht einfordern, obliegt die Medizin weitgehend den Ärzten. Dieses System hat viele gute Eigenschaften; und auch einige schlechte.

Das World Wide Web gibt uns die Möglichkeit, Personen mit gleichen Interessen zu finden und mit ihnen zu kommunizieren. Kaum jemand ist so motiviert wie kranke Menschen (oder solche, die sich für krank halten). Die Entwicklung einer „Web-basierten Medizin“ ermöglicht es ihnen, miteinander zu reden und Fakten, Meinungen und Klatsch ohne eine formale medizinische Aufsicht auszutauschen. Sie können Medikamente kaufen, die von der Schulmedizin nicht zugelassen sind, und sie können Selbstversuche durchführen: „Nichttraditionelle“ Medika-

mente erreichen angeblich die gleichen Verkaufszahlen wie regulär zugelassene. Patienten, die einen dicken Ordner mit Computerausdrucken über ihre Krankheit mitbringen, gehören inzwischen zum ärztlichen Alltag. Kurz, der Medizinerstand verliert die Kontrolle über den Fluss zuverlässiger medizinischer Information und, zu einem gewissen Grad, über die medizinische Behandlung, der sich ein Patient unterzieht.

Die Medizin ist im Wandel begriffen, und die Ärzte müssen mit einem gewaltigen Umfang an Information schritthalten. Patienten haben praktisch den gleichen Zugang zu Informationen wie Ärzte, aber oft eine viel größere Motivation, sich die Kenntnisse anzueignen. Sie können besser informiert sein als ihre Ärzte und sich (als Kollektiv) auf eine außergewöhnliche Erfahrungsbreite berufen. Das Internet lässt die Information – wahr, falsch, ungeprüft – ohne professionelle Beratung oder Begutachtung fließen.

Die Demokratisierung von Information und Expertise durch das World Wide Web und die Motivation von Gruppen motivierter Laien, Methoden selbst in die Hand zu nehmen, schwächt die Autorität von „Experten“ in der Gesellschaft. Reisebüros sind eine austerbende Art – man kann die Fahrkarten im Web bestellen; Finanzsoftware ersetzt den Steuerberater; eine offene Community von Programmierern entwickelte das Betriebssystem Linux; Computer übernehmen routinemäßig die Landung von Passagierflugzeugen. Hochversierte Umwelt- und Verbrauchergruppen, die Technologien so sehr als Hexenwerk deklarieren (manchmal mit exzellenter Wirkung), verfügen über große kollektive Erfahrung. Die Medizin entzieht sich zunehmend dem Griff der Ärzte. Sogar die Universitäten fürchten um ihr Monopol, Expertise zu bescheinigen.

Natürlich wird auch in Zukunft irgendjemand das Skalpell halten; ...oder irgendetwas: Die Hand, die das Messer führt, kann ebenso die einer Maschine sein.

Die Erde

8. Die Erde wird bewohnbar bleiben

Obwohl die Debatten über Umweltschutz und globale Erwärmung sich schier endlos hinziehen, sind für einen großen Teil der Welt diese Probleme noch abstrakt. Die Länder der Ersten Welt haben ihren Verbrauch an fossilen Energieträgern nicht reduziert, die Länder der Dritten Welt roden weiterhin Wälder zu Ödland, und Kohle ist der Energieträger der Wahl für einige der größten Ökonomien dieses Jahrhunderts.

Es scheint ein wachsendes Einverständnis darüber zu geben, dass anthropogene Emissionen – Kohlendioxid, Ruß, Methan und andere – in der Atmosphäre signifikant sind und zur globalen Erwärmung beitragen. Kein Konsens besteht jedoch über die Bedeutung einer steigenden globalen Temperatur für die Gesellschaft. Die Erdtemperatur hat während der letzten Jahrtausende einen sägezahnähnlichen Verlauf genommen: Wir befinden uns gegenwärtig in einer außergewöhnlich warmen Periode innerhalb dieses normalen Klimazyklus, und trotz unserer verderblichen Anstrengungen, den Planeten zu erwärmen, könnten die Temperaturen in Zukunft auch wieder fallen.

Doch was geschieht, wenn sich die Grundüberzeugung, dass die Erde bewohnbar bleibt (zumindest für Säuger), als falsch erweist? Veränderungen in der Umwelt werden wahrscheinlich relativ langsam verlaufen; selbst wenn wir den Eispanzer über Grönland weg-schmelzen würden, ist es unwahrscheinlich, dass wir damit die Balance des Planeten so weit verändern, dass die Erde zu einer Venus wird (New York und Tokio würden wir aber überfluten). Wir würden uns anpassen.

Andere Veränderungen – z. B. durch einen Nuklearkrieg oder einen großen Meteoritentreffer – würden uns wahrscheinlich viel weniger Zeit zur Anpassung und viel weniger Optionen lassen.

Wieviele technische Sicherungsmaßnahmen welcher Art sollten wir gegen Ereignisse ergreifen, die die Bewohnbarkeit der Erde grundlegend verändern könnten? Es gibt viele Möglichkeiten zur spürbaren Reduzierung der

Kohlenstoffemissionen: Ersatz von Benzin- durch effiziente Dieselmotoren, Entwicklung hocheffizienter Brennstoffzellen, Optimierung von Solar- und Windenergie, Wiedereinführung der Kernkraft. Industrielle Lösungen gegen Umweltverschmutzung könnten schneller umgesetzt werden, wenn aktiv in „grüne“ Technologien investiert würde; die Investitionsrate ist im Wesentlichen eine Frage von Regulierung und öffentlicher Politik, allerdings kompliziert durch die Tatsache, dass Regulierungen lokal in den einzelnen Staaten durchgesetzt werden müssen, das Problem aber global ist.

Was die Kernenergie betrifft, sind technische Aspekte weniger wichtig als politische, und das Problem eines Meteoriteneinschlags wird von uns bislang nicht ernst genommen.

9. Nationen sind die mächtigsten menschlichen Organisationen

Die Welt ist gegenwärtig in Nationen organisiert – soziale und politische Einheiten mit definierten geographischen Grenzen. Nationen waren sinnvoll in einer Welt, in der Wohlstand auf natürlichen Ressourcen, fruchtbarem Land, Wasser und Menschen gründete. Reich waren solche Nationen, die auf gewaltige Naturressourcen zugreifen konnten und die Zugang zu Handelsrouten hatten. Reich waren auch solche Nationen, die es sich leisten konnten, Krieg zu führen.

Mit Nationen als zentralen politischen Einheiten war es leicht, die Übersicht zu behalten. Inzwischen hat sich aber einiges bewegt. Es ist jetzt wichtiger, Informationen zu kontrollieren und zu nutzen als nach Bauxit oder Diamanten zu schürfen. Es ist wichtiger, eine gut ausgebildete Bevölkerung zu haben als große Kohlereserven. Der Strom von Informationen und die Schwierigkeit, ihrer habhaft zu werden, eröffnet Gelegenheiten für kleine Gruppen von Personen. Das Internet bietet fast allen und fast umsonst Zugang zu einer Flut nützlicher Informationen. Die Informationstechnologie hat den Begriff Wohlstand neu definiert – materielle Güter weichen Informationen und Dienstleistungen – und stellt damit auch die zentrale Bedeutung von Nationen – die

einen physischen Raum, nicht aber den Informationsraum kontrollieren – offen infrage.

Was den Krieg betrifft: Der Kalte Krieg war eine Periode, in der sich die beiden mächtigsten Nationen in einem Wettrüsten gegenüberstanden, das nach vorgeblich konventionellen Regeln organisiert war: mit Armeen und Waffen. Die Armeen wurden nie direkt gegeneinander eingesetzt, waren aber in Stellvertreterkriege in Korea, Vietnam und Afghanistan verwickelt. Letztlich zeigte sich, dass es ein ökonomischer Konflikt war: Die USA haben hauptsächlich deshalb gewonnen, weil die Sowjetunion sich wirtschaftlich übernehmen musste, um Schritt zu halten.

Indem Informationen, Informationssysteme und Menschen zu entscheidenden Faktoren für Wohlstand werden, werden große Länder (vor allem solche mit offenen Gesellschaften) anfälliger gegen Cyber-Attacken. Die USA und die Sowjetunion hatten viele Jahre auch ein faktisches Monopol auf strategische Nuklearwaffen – ein entsprechendes Monopol auf terroristische, vor allem biologische Waffen existiert nicht. Joshua Lederberg drückte das so aus, dass „biologische Waffen einen einzelnen Mann in die Lage versetzen, einen Krieg zu führen“; und so rangieren biologische und Cyber-Angriffe in ihrer Bedrohung für die Gesellschaft gleichauf mit atomaren Angriffen. Als mögliche Angreifer sehen wir kleine Länder und nichtstaatliche Einheiten wie kriminelle, religiöse oder ideologische Gruppen oder gar Unternehmen.

Die Technologie driftet allmählich von den Nationen als zentralen politischen Einheiten weg und hin zu supranationalen Einheiten, zu Allianzen, Wirtschaftsregionen, multinationalen Konzernen, Kapitalgruppen, Religionen. Dadurch entstehen Risiken für die entwickelten Länder, die auf den Werten von Offenheit und Kapitalismus gründen und der Mobilität von Personen, Informationen und Waren niedrige Hürden setzen. Diese Offenheit der westlichen Gesellschaften macht es schwer, sie zu verteidigen. Die Entwicklung neuer Technologien zur Verteidigung – Sensoren, Wirkstoffe und Abwehragenten („defensive agents“) gegen biologische Angriffe, Software-Agenten und Sicherheitssysteme zum

Schutz von Computernetzwerken – ist eine wichtige Aufgabe und fordert auf zentrale Weise die Chemie.

Die Entscheidung, was an Schutz „genug“ und was „zuviel“ ist – d. h. das Abwägen von Sicherheitsbedürfnis und Datenschutz –, bedarf einer breiten Diskussion in der Öffentlichkeit.

Nicht alles ist auf Sand gebaut

Gibt es dann also nichts, was gesichert ist? Die Antwort ist, dass wir es nicht wissen, aber eine Reihe von Grundüberzeugungen werden höchstwahrscheinlich nicht fallen: Wir sind überzeugt, dass es unmöglich ist, Gedanken zu lesen, physische Gegenstände zu teleportieren oder schneller als Licht im Vakuum zu reisen. Wir sind überzeugt, dass wir die Zeit nicht rückwärts laufen lassen können und dass die fundamentalen Gesetze der Physik, die im Laufe der letzten Jahrhunderte entdeckt wurden, auch künftig gültig bleiben: Wasser bei Raumtemperatur wird sich nicht spontan in Dampf und Eis trennen; Objekte werden sich nicht spontan entgegen der Gravitation erheben; wir werden keine Quelle für Energie aus dem Nichts finden. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik wird auch weiterhin die Welt beschreiben, in der wir leben. Nicht alles ist auf Sand gebaut.

Gibt es Fragen, die wir nicht stellen sollten?

Ist die „große“ Wissenschaft – Wissenschaft, die die Welt verändert – gut für die Welt, die sie verändert? Ich bin Optimist und würde antworten „gewöhnlich ja“. Wir (zumindest wir in der entwickelten Welt) leben länger als unsere Vorfahren und müssen weniger von unserer Lebenszeit auf den Kampf ums tägliche Überleben aufwenden; wir leiden weniger unter Krankheiten, wir verstehen die Welt besser, wir haben mehr Zeit, unsere Gesellschaften zu entwickeln und unser Dasein zu genießen. Ich *glaube*, dass die Wissenschaft in der Vergangenheit *generell* für das Allgemeinwohl gearbeitet hat und dies auch in Zukunft tun wird. Dennoch werden Wissenschaft und Technik auch

Türen entriegeln, die wir dann vielleicht nicht öffnen wollen.

Wissenschaft, die die Welt unausweichlich verändert, wirft ethische Fragen auf. Ein Mikrofluidsystem zur Analyse des menschlichen Genoms zu entwickeln, mag technisch kaum schwieriger sein als die Entwicklung eines besseren Katalysators für die Produktion von Polyethylen – die Bedeutung für unsere Gesellschaft ist aber weitaus größer.

Als Wissenschaftler kommt uns in der Diskussion über die Folgen von Wissenschaft eine besondere Rolle zu. Wir wissen, dass Dinge getan werden, *bevor* sie getan werden; wir wissen, dass einige Dinge nicht getan werden können; wir können über Dinge spekulieren, die getan werden *könnten*. Wir können andere auf mögliche Veränderungen aufmerksam machen und an Diskussionen und Entscheidungen teilnehmen und Entwicklungen in die richtige Richtung lenken. Wir können versuchen zu verhindern, dass Furcht vor neuen Ideen nutzbringende Technologien blockiert. Wenn wir uns entschließen, an Problemen zu arbeiten, die die Gesellschaft verändern, sollten wir uns auch verpflichten, der Gesellschaft begreiflich zu machen, wie sie davon profitieren kann und welchen Preis sie für diese Veränderungen zu zahlen hat.

Wir können aufzeigen, welche Türen geöffnet werden können und was uns dahinter erwartet. Unsere Mitmenschen werden nach ihrem eigenen Verstand entscheiden, ob sie diese Türen öffnen und über die Schwelle schreiten möchten.

Schließlich: Gibt es Forschung, die nicht sein darf? Es gibt banale Fälle – ich kann keinen Nutzen darin sehen, Forschung über multiresistente Anthrax-Stämme öffentlich zugänglich zu machen –, aber ein Großteil der Forschung lässt sich nicht einfach als „gut“ oder „schlecht“ klassifizieren.

Die Chemie trägt auf breiter Basis zu den Grundlagen der Technologie bei, und daher ist es schwierig, ihren künftigen Einfluss abzuschätzen: Eine neue chemische Reaktion kann zu einem Krebstherapeutikum oder zu einer Chemiewaffe führen. Einige Technologien, die bereits in Reichweite liegen – Technologien, die das Leben spürbar verlängern oder neue Formen von Leben

entwickeln oder zu empfindenden Systemen führen –, werden sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich bringen. Diejenigen von uns, die an diesen Problemen arbeiten, sollten sich verpflichtet fühlen, ihren Mitmenschen vollständig und unmissverständlich zu erklären, was sie tun, warum sie es tun und (in dem geringen Ausmaß wie sie es können) mit welchen Folgen.

Die Menschheit wird tun was sie tun wird, aber zumindest sollte jeder, soweit es ihm möglich ist, begreifen, was zur Wahl steht und welches die jeweiligen Konsequenzen sind. Die Chemie kann, indem sie sich stärker für Gesamtprobleme interessiert (und auch Verantwortung dafür übernimmt), wesentlich zum Verstehen beitragen.

Danach werden die Überraschungen die Szene beherrschen. Die letzte, realistischste Grundüberzeugung könnte sein, dass das Gesetz der unbeabsichtigten Folgen zur Anwendung kommt.

Online veröffentlicht am 24. Juni 2004

Vertiefende Literatur zum Thema:

- J. N. Abramovitz, *Vital Signs 2002: The Trends that are Shaping the Future*, Norton, New York, **2002**.
 C. M. Christensen, *The Innovator's Dilemma*, Harvard Business School Press, Boston, **1997**.
 H. Collins, T. Pinch, *Der Golem der Forschung. Wie unsere Wissenschaft die Natur erfindet*, Berlin Verlag, Berlin, **1999**.
 J. Diamond, *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*, Norton, New York, **1997**.
 P. Feyerabend, *Wider den Methodenzwang*, Suhrkamp, Frankfurt, **1983**.
 R. P. Feynman, *Feynman Lectures on Computation*, Addison-Wesley, New York, **1996**.
 Y. Fukuyama, *Das Ende der Geschichte*, Kindler, München, **1992**.
 J. Horgan, *An den Grenzen des Wissens. Siegeszug und Dilemma der Naturwissenschaften*, Fischer, Frankfurt, **2000**.
 A. Huxley, *Schöne neue Welt*, Fischer, Frankfurt, **2002** (Erstauflage 1932).
 T. S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Suhrkamp, Frankfurt, **1967**.
 R. Kurzweil, *The Age of Intelligent Machines*, MIT Press, Cambridge, **1993**.
 P. A. Lawrence, *The Making of a Fly*, Blackwell, London, **1992**.
 H. Lodish, A. Berk, L. S. Zipursky, P. Matsudaira, D. Baltimore, J. Darnell, *Molecular Cell Biology*, Freeman, New York, **2000**.
 J. R. Maddox, *Was zu entdecken bleibt*, Suhrkamp, Frankfurt, **2000**.

L. McLaughlin, *The Pill, John Rock, and the Church: Biography of a Revolution*, Little and Brown, New York, **1982**.
S. Pinker, *Wie das Denken im Kopf entsteht*, Kindler, München, **1998**.
K. Popper, *Logik der Forschung*, Mohr, Tübingen, **1994**.
J. S. Rigden, *Hydrogen, The Essential Element*, Harvard University Press, Cambridge, **2002**.

E. Schrödinger, *Was ist Leben?*, Piper, München, **1999**.
S. J. R. Searle, *Geist, Hirn und Wissenschaft*, Suhrkamp, Frankfurt, **1986**.
A. M. Turing, M. Woodger, *The Automatic Computing Engine*, MIT Press, Cambridge, **1986**.
H. C. von Baeyer, *Maxwell's Demon*, Random House, New York, **1998**.

M. Mitchell Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, Simon and Schuster, New York, **1992**.
R. Weinberg, *One Renegade Cell: How Cancer Begins*, Basic Books, New York, **1998**.

The Nucleus of Knowledge

Robert A. Meyers (Ed.), Ramtech Ltd., Tarzana, CA, USA

Encyclopedia of Molecular Cell Biology and Molecular Medicine

2nd Edition, 16 Volume Set

Highly acclaimed and referenced by the scientific community, the *Encyclopedia of Molecular Biology and Molecular Medicine* is now entering its second edition. The new edition features extensive new material on the molecular aspects of cell biology, which is reflected in its new title: *Encyclopedia of Molecular Cell Biology and Molecular Medicine*. With new articles on functional genomics, proteomics, and bioinformatics, there is no better, cutting-edge reference in the field.

"This series is a classic..."

Molecular Medicine Today/Trends in Molecular Medicine

<http://meyers-emcbmm.de>

John Wiley & Sons, Inc., Customer Care,
Fax: +1 800-597-3299, e-mail: custserv@wiley.com, www.wiley.com
Wiley-VCH, Customer Service Department,
Fax: +49 (0) 6201-606-184, e-mail: service@wiley-vch.de, www.wiley-vch.de
John Wiley & Sons, Ltd, Customer Services Department,
Fax: +44 (0) 1243-843-296, e-mail: cs-books@wiley.co.uk, www.wiley-europe.com

 WILEY

 WILEY-VCH

68343072_ba