

Chemie neu erfinden

George M. Whitesides*

Chemie · Veränderung · Wissenschaft

Das Ende einer Ära und der Beginn einer neuen

Nichts währet ewig. Die Jahrzehnte nach dem Zweiten Weltkrieg waren segensreich für die Chemie. Universitäten und die chemische Industrie – eine der fruchtbarsten Partnerschaften, die unsere hochtechnisierte Gesellschaft gesehen hat – entwickelten sich zu der Struktur, die wir heute kennen. Die industrielle Chemie wurde ein wesentlicher Bestandteil der industriellen Welt; die akademische Chemie erklärte, wie Atome und Moleküle die Welt aufbauen.

Wie hat es angefangen? Der Zweite Weltkrieg erschuf eine Flut von Chemie-relevanten Technologien. Treibstoffe mit hoher Oktanzahl und synthetische Kunststoffe waren die ersten von vielen großen Expansionen der chemischen Industrie. Katalyse – vor allem heterogene Katalyse – wurde zum Herzstück von Synthesen in großem Maßstab. Neue Trennmethoden revolutionierten die Aufreinigung. Neue Formen der Spektroskopie enthüllten den Aufbau von Molekülen. Die Quantenchemie erklärte chemische Bindungen, und die Theorie der Molekülorbitale machte diese Erklärungen relevant für komplexe Moleküle. Die Entwicklung von Computern und computerbasierten Simulationen fand ihren Anfang. Die technischen und die konzeptionellen Fähigkeiten der Chemie erweiterten sich drastisch. Zur gleichen Zeit boten der wirtschaftliche Neuaufbau Europas und Japans und der Wiederaufbau der Infrastruktur der USA Gelegenheiten zu kommerzieller Expansion. Obwohl sich das schnelle Wachstum der Chemie ursprünglich auf die USA konzentrierte, breitete es sich bald auf die anderen Industriestaaten aus.

Es war eine gute und in gewissem Sinne sehr leichte Zeit für die Chemie: komplexe organische Synthese, Quantenchemie, Laserspektroskopie, Herstellung von Polyolefinen, metallorganische Chemie, Forschung mit Molekülstrahlen, medizinische Chemie und unzählige andere Gebiete entwickelten sich und blühten auf. Die Bandbreite kommerzieller und wissenschaftlicher Gelegenheiten war sehr groß.

Diese fruchtbare Ära ist vorbei, und die Chemie steht jetzt vor Herausforderungen, auch eingedenk der Verantwortung gegenüber der Gesellschaft, die sogar *noch* interessanter, jedoch völlig anders sind. Sie werden – wie ich glaube – eine Neustrukturierung der Chemie als Forschungsgebiet erfordern und zu der fundamentalen Frage führen: „Wie muss

die Chemie der Zukunft sein?“ Sie ist eine Wissenschaft gewesen, die Atome, Bindungen, Moleküle und Reaktionen studierte. Und in 50 Jahren? Wird sie immer noch das Studium von Molekülen und ihrem Verhalten sein? Oder wird sie sich mit komplexen Systemen beschäftigen, die Moleküle in jeglicher Form, ob „chemisch“ hergestellt oder nicht, einbeziehen (wie in den Materialwissenschaften, der Biologie, der Geologie, der Stadtplanung und so weiter)? Jede einfache Definition der Disziplin Chemie – oder zumindest jede einfache Definition wie „Chemie beschäftigt sich mit Atomen, Molekülen und Reaktionen“ – scheint nicht länger zu ihrem Potential, der Verpflichtung von Chemikern gegenüber der Gesellschaft und der Komplexität der Herausforderungen, vor denen die Menschheit steht, zu passen.

Während der gesamten produktiven Nachkriegszeit hat „die Chemie“ immer das Praktische und das Konzeptuelle vereint. In der Nachkriegsära entwickelte sich die akademische Chemie – mit ihrem Fokus auf Verstehen, Analysieren und Synthetisieren – Seite an Seite mit der chemischen Industrie – als Produzent der Chemikalien für die Gesellschaft.^[1] Die zwei werden oft als separiert, ja sogar antagonistisch beschrieben. Weit gefehlt! Der gegenseitige Austausch – obwohl normalerweise ungeplant und ungezielt – war von außergewöhnlichem Vorteil für beide. Die Entdeckung nützlicher neuer Phänomene – oft durch die Industrie – bot Ausgangspunkte für akademische Forschung. Die Universitäten entwickelten ihrerseits theoretisches und mechanistisches Verständnis, das in der Industrie die Entwicklung verbesserter Prozesse und neuer Produkte stimulierte. Akademische Forschung ersann neue analytische Methoden, die Gerätehersteller in leicht zu bedienende, ausgereifte und für die chemische Forschung unersetzliche Werkzeuge umsetzten. Sowohl industrielle als auch universitäre Forscher entwickelten neue Synthesemethoden und neue Materialien. Computer und Simulationen veränderten die Definition eines „Experiments“ für beide. Jeder gewann. Dieser stimulierende Austausch von Informationen zwischen akademischen und industriellen Laboratorien blühte bis in die 1980er Jahre und verlangsamte sich anschließend.

Die Ära nach dem Zweiten Weltkrieg ist nun vorbei. Seit den 1990er Jahren hat sich die chemische Industrie auf Prozessverbesserungen konzentriert und nur wenige fundamental neue Produkte eingeführt. Obwohl sich die akademische Chemie neue Felder erschlossen hat (Biochemie, Materialwissenschaften und theoretische Chemie sind Beispiele) und die Zahl der Chemifakultäten stark gestiegen ist, haben sich die Kerndisziplinen immer mehr in Richtung „Iteration“ und „Verbesserung“, weg vom „Entdecken“ bewegt.

[*] Prof. G. M. Whitesides

Department of Chemistry and Chemical Biology
Harvard University, Cambridge MA 02138 (USA)
E-Mail: gwhitesides@gmwgroup.harvard.edu

Das Versiegen des Stroms neuer Ideen und kommerzieller Möglichkeiten, welches das Ende der Periode nach dem zweiten Weltkrieg markierte, war unvermeidbar: Alles hat ein Ende. Und das Problem ist sicher nicht, dass der Gesellschaft die Probleme ausgegangen wären, die die Chemie lösen könnte. Ich würde sogar das Gegenteil behaupten: Die Chemie ist mit ihrem Potential möglicherweise die wichtigste Wissenschaft, die Probleme der Gesellschaft zu lösen.

Also: Was sind diese (neuen) Probleme? Wie muss sich die Chemie verändern, um sie anzugehen? Was kommt als Nächstes? Die Wissenschaft und die Technologie, die in der Nachkriegszeit entwickelt wurden, werden als Fundament für das, was auch immer aus der Chemie wird, fortdauern, aber die vordringlichen Gelegenheiten liegen jetzt auf neuen Feldern. Diese Gelegenheiten zu ergreifen, wird neue Fähigkeiten der Chemiker und eine neue Struktur der Chemie erfordern.

Drei vorläufige Punkte: Meinungen, Begriffe und eine Zusammenfassung. Ich möchte erstens klarstellen, dass dieser Essay eine Vorausschau, keine klassische Literaturanalyse ist. Ich werde Meinungen äußern, diese aber – zumindest in einigen Fällen, in erster Linie um Platz zu sparen – als Behauptungen formulieren; ich entschuldige mich für die stichwortartige Darstellung. Ich beabsichtige, Ideen und Meinungen als Grundlage für Diskussionen zu äußern, keine Fakten.

Eine zweite Bemerkung – und eine mit einem zentralen Punkt des Essays eng verwandte – hat mit Begriffen zu tun. Einer der internen Streitpunkte in der Chemie – und in anderen Feldern der Wissenschaften – betrifft den relativen Wert von Forschung, die (vordergründig) allein auf Neugier basiert, und Forschung, die sich (möglicherweise) allein mit dem Lösen von Problemen beschäftigt. Ich werde keinen Unterschied zwischen den beiden machen – nicht zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung, nicht zwischen Wissenschaft und Ingenieurwesen – und zwar nicht, weil sie nicht unterschiedlich wären, sondern weil sie ein gemeinsames Ziel verfolgen, weil sie so sehr überlappen, dass es oft unmöglich ist sie auseinanderzuhalten, und weil sie nahtlos zusammenarbeiten müssen, um die Probleme, denen die Menschheit gegenübersteht, zu lösen. Ich werde das Wort „Grundlagenforschung“ verwenden, um jegliche akademische Forschung und nicht proprietäre industrielle Forschung zu beschreiben; damit meine ich jegliche Forschung, die zu einem jedermann zugänglichen Wissensfundus beiträgt.^[2]



George M. Whitesides studierte an der Harvard University (BA 1960) und promovierte 1964 am California Institute of Technology (bei J. D. Roberts). Er begann seine unabhängige Karriere am MIT und ist heute Woodford L. and Ann A. Flowers University Professor an der Harvard University. Seine derzeitigen Forschungsinteressen umfassen: physikalische und organische Chemie, Materialwissenschaften, Biophysik, Wasser, Selbstorganisation, Komplexität und Simplizität, Ursprung des Lebens, dissipative Systeme, preiswerte Diagnostik und Robotik.

„Grundlagenforschung“ beinhaltet von Neugier getriebene Forschung, problembasierte Forschung, empirische Forschung, theoretische Forschung, numerische Forschung und andere Ableger der Forschung. Ich betone auch, dass ich das Wort „Chemie“ (normalerweise) als Abkürzung für „Chemische Wissenschaft und chemisches Ingenieurwesen“ verweise.

Drittens werde ich meine Sichtweise in fünf Punkten zusammenfassen:

- 1) Die Chemie beendet eine Ära von außerordentlichem intellektuellem Wachstum und kommerziellem Erfolg, angetrieben von einer Explosion von Wissenschaft und Technologie und einer parallelen und beidseitig vorteilhaften Expansion von akademischer und industrieller Chemie. Die enge Verbindung zwischen beiden war für beide Seiten von immensem Vorteil.
- 2) Die neuen Gelegenheiten, die sich eröffnen, sind womöglich sogar noch größer – sowohl in Bezug auf die intellektuelle Herausforderung als auch bezogen auf das Potential der Auswirkung auf die Gesellschaft – als die der reichen, nun vergangenen Periode.
- 3) Diese neuen Herausforderungen sind jedoch von viel größerer Bandbreite und Komplexität als die einfacheren vorausgegangenen Probleme, und wir benötigen neue Strukturen und Methoden, um Lösungen zu erarbeiten. In der Chemie geht es in Zukunft nicht nur um Atome und Moleküle, sondern auch um das, was sie – mit ihren einzigartigen Fähigkeiten, Moleküle und Materie zu beeinflussen und zu verändern – leisten kann, um komplexe Systeme, die natürlich aus Atomen und Molekülen bestehen, zu verstehen, zu beeinflussen und zu kontrollieren: Ihre Zukunft erstreckt sich von der Beschäftigung mit lebenden Zellen bis zu der mit Megastädten und von der Nutzung von Sonnenlicht bis zur Verbesserung der medizinischen Versorgung. Um diese Probleme effizient zu behandeln, muss die akademische Chemie das „Problemlösen“ und das „Verstehen“ besser integrieren. Und sie muss Studenten die Fähigkeiten beibringen, Probleme anzugehen, die während ihres Studiums noch nicht einmal als Probleme existieren. Die chemische Industrie muss entweder ihr auf Massenproduktion und Dienstleistung basierendes Geschäftsmodell erweitern und sich wieder mit dem Erfinden beschäftigen oder der Aussicht ins Auge sehen, sich in einer Ecke der Industriegesellschaft niederzulassen, die zwar relativ komfortabel ist, mit Technologien, die die Welt verändern, aber nichts zu tun hat.
- 4) In der neuen Ära würden sowohl die akademische als auch die industrielle Chemie (idealerweise in Kooperation mit staatlichen Einrichtungen) davon profitieren, die Unterscheidung von Wissenschaft und Ingenieurwesen, von neugiergetriebener Forschung und dem Lösen von schwierigen Problemen und von Chemie und anderen Disziplinen – von den Materialwissenschaften zur Soziologie – aufzugeben.
- 5) Zusammengefasst muss die Chemie ihren Daseinszweck erweitern – von der Erforschung von „Molekülen“ zu „allem, was Moleküle einbezieht“. Für die akademische Chemie wird diese Erweiterung zu neuen intellektuellen und praktischen Herausforderungen führen, und sie wird

ihrer ethischen Verpflichtung gegenüber dem Steuerzahler, der die Rechnung zahlt, nachkommen. Für die industrielle Chemie würde die Erweiterung ihrer Bandbreite die Tür zu neuen kommerziellen Gelegenheiten und zukünftigem Wachstum öffnen. Für Regierung und Gesellschaft würden Fähigkeiten verfügbar, die zur Lösung von Problemen benötigt werden, die gegenwärtig unlösbar sind.

70 Jahre

Drei Gruppen kooperierten, um nach dem 2. Weltkrieg die moderne Chemie aufzubauen: die Universitäten, die chemische Industrie und Regierungen bzw. staatliche Institutionen. Das Fundament des Vorhabens hatte die chemische Industrie gelegt, die schon fast ein Jahrhundert existierte.^[1] Der erste *neue* Grundstein war das, was wir heute „Forschungsuniversität“ nennen.^[3] Diese neue Art von Universität wurde in den USA erfunden und zählt zu ihren Aufgaben – über die Ausbildung von Studenten hinaus – das Forschen und die Entwicklung neuer Technologie, beides von der Regierung gefördert. Es war ein Produkt der Sorge um die nationale Sicherheit in der Nachkriegszeit.

Die „Forschungsuniversität“. Die Forschungsuniversität war ein utilitaristisches Konstrukt, basierend auf der Wahrnehmung, dass Wissenschaft und Technologie eine zentrale Rolle für den Ausgang des Zweiten Weltkriegs spielten,^[4] und dass es förderlich (und in der Tat strategisch entscheidend) war, dass die Regierung in Universitäten Strukturen errichtete, in denen die national als notwendig erachteten Technologien entwickelt werden konnten. Das sehr einflussreiche Dokument, das benutzt wurde, um staatliche Förderung von akademischer Forschung zu rechtfertigen – „The Endless Frontier“ – wurde von Vannevar Bush verfasst.^[3b,5] Er argumentierte, dass Technologie nützlich ist, um drei für die Gesellschaft wichtige Ziele zu unterstützen: nationale Sicherheit, Gesundheit und Arbeitsplätze. Es war keine Lobrede auf von Steuermitteln finanzierte Grundlagenforschung.

In den 1960er und 70er Jahren war der Kalte Krieg in seiner instabilsten Phase, die wissenschaftliche Elite klein, und es stand sehr viel Geld zur Verfügung. Physik – wegen ihrer Bedeutung für den Kalten Krieg, die Mikroelektronik und den Sputnik – war die dominante Wissenschaft. Neugiergetriebene Forschung – das „Spielen“ – war einfach zu begründen, und wegen eines Überusses an wissenschaftlichen Gelegenheiten häufig produktiv. Aus dieser Periode stammt das Anspruchsdenken, das davon ausgeht, dass öffentliche Gelder gut eingesetzt sind, wenn sie ohne weitere Verpflichtungen an Wissenschaftler an Universitäten vergeben werden – basierend auf der Annahme, dass ihre (veröffentlichten) Ergebnisse ein Reservoir von Wissen bereitstellen, aus dem sich die Entwicklung von Technologien schöpft.

Der Widerspruch zwischen der utilitaristischen Aussage von „The Endless Frontier“ und dem verständlichen Verlangen, ein Forschungsstipendium ohne Verpflichtungen zur Verfügung zu haben, war seither eine Quelle von Konflikten und Streit in der akademischen Wissenschaft und in der Forschungspolitik. Das Argument „pro Stipendium“ ist, dass

(als einzigartiges Beispiel) neugiergetriebene Forschung zur Quantenmechanik – sicherlich die wichtigste Entdeckung des vergangenen Jahrhunderts – geführt hat und später zu fundamentalen Erkenntnissen in der Genforschung. „Gezielte Forschung“, so ist das Argument, „könnte es niemals besser machen“. Das Argument „kontra Stipendium“ ist, dass das Geld für die Forschung vom Steuerzahler kommt, der eine Gegenleistung erwartet und verdient, dass ungezielte Forschung oft ziellose Forschung wird (und in jedem Fall einen geringen Ertrag an wichtigen wissenschaftlichen Ergebnissen und Technologien hat), und dass das Arbeiten an realen Problemen zu einer besseren Grundlagenwissenschaft führt als das Arbeiten ohne Randbedingungen (Abbildung 1). Ein

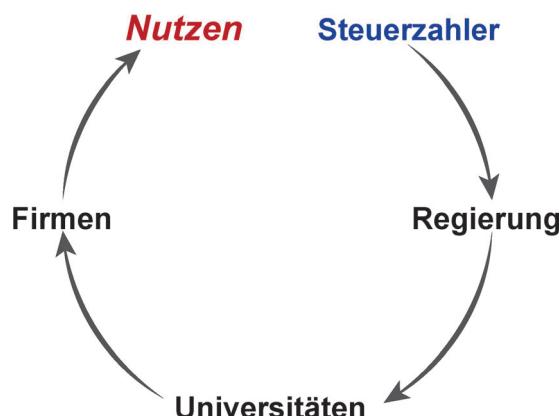


Abbildung 1. „Folge dem Geld!“ Steuerzahler (Einzelpersonen und Firmen) geben der Regierung Geld in der Hoffnung, dass Gutes daraus entstehen wird, und weil es das Gesetz verlangt. Die Regierung gibt eine kleine Menge davon weiter an akademische Forscher (hauptsächlich um langfristige Forschung mit einem potentiellen gesellschaftlichen Nutzen in einem frühen Stadium zu fördern) und die Industrie (hauptsächlich um Produkte zu erwerben und bestimmte Dienste in Anspruch zu nehmen, die Forschung und Entwicklung beinhalten können). In einer idealen Welt arbeiten Firmen und Universitäten zusammen, um Technologien zu entwickeln, die dem Steuerzahler einen Nutzen bringen. Die Unterstützung von Universitäten ist kein natürliches Anrecht, es ist eine Investition des Steuerzahlers; ob diese Investition besser durch freie Forschung oder durch eine auf Problemlösung ausgerichtete Forschung erfüllt wird, ist Ansichtssache.

Beispiel ist das Internet – mit Sicherheit eines der wichtigsten, jemals entwickelten (wissenschaftlichen) Werkzeuge –, das als redundantes Kommunikationssystem zwischen Raketen silos entwickelt wurde. Ein anderes Beispiel: einerseits wird behauptet, die Antwort der biomedizinischen Forschung auf das Auftreten von AIDS und die darauffolgenden, wirklich bemerkenswerten Fortschritte in der Behandlung viraler Krankheiten, basierten auf den Erfolgen ungezielter Forschung in der Virologie; alternativ wird behauptet, dass gezielte Forschung in vielen Bereichen, von Nixons „Krieg-gegen-Krebs“-Projekt (in dem, größtenteils inkorrekt, angenommen wurde, dass Krebs eine virale Krankheit sei, das aber ein entscheidendes Fundament für die Retrovirologie errichtete) bis hin zur industriellen pharmazeutischen Forschung, die zu ersten HIV-Proteaseinhibitoren und schließlich zur Dreifachtherapie führte, die Antwort auf AIDS er-

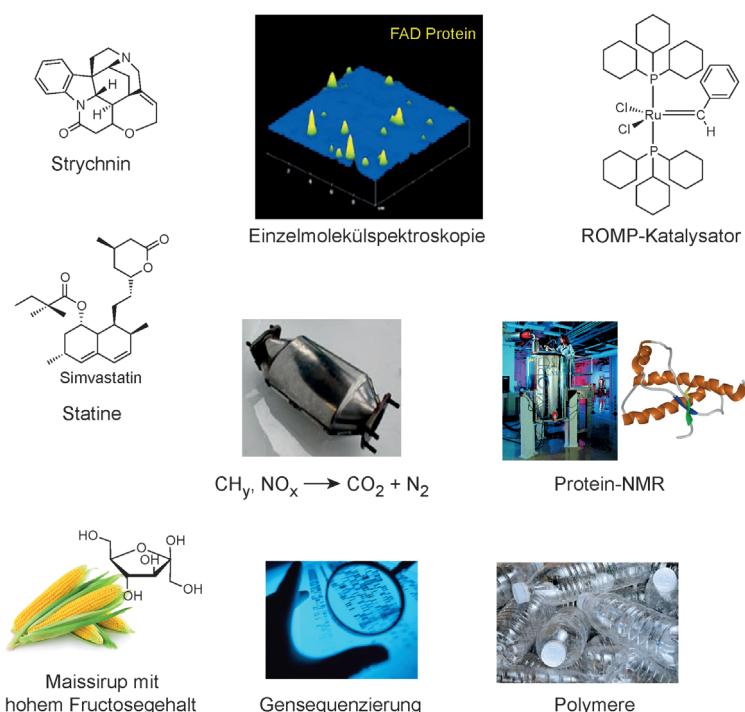


Abbildung 2. Die Chemie war in den letzten 70 Jahren außerordentlich kreativ und produktiv. Beispiele (eine kleine Zahl, eigenwillig aus einer Liste von hunderten gewählt) reichen von Strategien für die Synthese komplexer Moleküle über die Produktion von Kunststoffen und von neuen Katalysatoren und Reagentien bis zu Medikamenten, Nahrungsmitteln und Systemen zur Schadstoffkontrolle. Analysemethoden sind Grundlage und Voraussetzung vieler dieser Entwicklungen.

möglichte. Die gesamte Anstrengung erbrachte einen großartigen Erfolg, aber es ist schwer – sogar im Rückblick –, die Beiträge von „gezielter“ und „neugiergetriebener“, von akademischer und industrieller Forschung auseinanderzuhalten. Aus welchen Gründen auch immer hat diese Mischung sehr gut funktioniert: Die Chemie war außerordentlich produktiv (Abbildung 2).

Unbeschadet dieser Historie haben sich Wissenschaftler daran gewöhnt, wenig oder keine Rechenschaft über ihre Wissenschaft abzulegen. Und Universitäten haben sich daran gewöhnt, Forschungsförderung als Quelle für „Betriebseinkommen“ zu fixieren. Die vielen „einfachen“ Gelegenheiten für Entdeckungen – kombiniert mit einem System von akademischen Anreizen und Belohnungen (das immer noch existiert) – begünstigten einen Forschungsstil, bei dem ein Professor und seine Doktoranden im Zentrum stehen, in der Regel ohne externe Kollaborationen.

Darwinistische Evolution von Teilgebieten. Die Chemie begann eine Ära der Expansion mit einer traditionellen Struktur: es gab organische, anorganische, physikalische und analytische Chemie. Obwohl man hart daran gearbeitet hat, diese disziplinäre Struktur zu erhalten, haben uneingestandene Annäherungen und leicht erkennbare Veränderungen in den Subdisziplinen eine neue Struktur hervorgebracht. Die Synthese von strukturell komplexen Naturstoffen, ein dominantes, frühes Teilgebiet, war wohl genauso ein Produkt neuer instrumenteller Methoden – HPLC, GC, NMR, MS und Röntgenkristallographie, die es möglich machten, kom-

plexe Strukturen zu bestimmen – wie auch der Entwicklung ausgeklügelter Synthesestrategien. Ähnlich entstand an der Schnittstelle von organischer und anorganischer Chemie dank neuer Strukturaufklärungsmethoden und Ergebnissen der klassischen Katalyseforschung die metallorganische Chemie und metallorganische Katalyse. Chemie und Biologie verschmolzen und erschufen die Biochemie, ein heute beliebtes Feld.

Die Materialwissenschaften sind ein anderes Produkt dieser Ära und besonders relevant für die Frage, ob „gezielte“ oder „ungezielte“ Forschung besser ist. Diese mittlerweile höchst respektierte akademische Disziplin wurde von der US-Regierung gezielt eingerichtet, um einen Bedarf zu erfüllen. Die Keimzelle war eine Gruppe von interdisziplinären Laboratorien, die vom Verteidigungsministerium und der National Science Foundation in den USA gegründet und gefördert wurden, um Universitäten Formen von multidisziplinärer Expertise bereitzustellen, die in den großen Firmenlaboratorien von General Electric, Boeing, IBM, Bell Labs und DuPont zu finden waren, und für die Entwicklung militärischer Systeme benötigt wurde.

Das explodierende Interesses an der Biochemie und chemischen Biologie kam teilweise natürlich von der Faszination der Biologie, teilweise aber auch von der immensen finanziellen Förderung durch die National Institutes of Health, getrieben von einer Bevölkerung (Steuerzahler), die sich ein möglichst langes Leben wünscht.

Die Evolution der akademischen Chemie war also nie die einfache Folge von freier, neugiergetriebener Forschung: Sie war das Produkt einer Ansammlung viel komplexerer Prozesse, einschließlich der Veränderung wissenschaftlicher Gelegenheiten, Entdeckungen und Entwicklungen in der Industrie, nationalen Prioritäten, des Ausnutzens von im Zweiten Weltkrieg zu anderen Zwecken entwickelten Technologien, der Geopolitik des Kalten Krieges, der gemeinsamen Evolution von analytischen Systemen und Wissenschaftlern, die diese Systeme verwendeten, und der Entwicklung von Computern, Lasern, Gensequenzierungsautomaten und anderer Werkzeuge von großer Bedeutung. Die Evolution der Chemie spiegelt auch die Wahl von Studenten und jungen Professoren wider: Jedes Teilgebiet wurde, sobald es erblühte (und verbüllte), durch die Augen von neuen Studenten und neuen Professoren aufgrund seiner grundlegenden wissenschaftlichen Interessantheit, der Verfügbarkeit von Finanzierung und der letztendlichen Aussicht auf Arbeitsstellen und Aufstiegschancen gewichtet und beurteilt.

Akademische Chemie ist heute konservativ, individualistisch und kompetitiv. Jetzt, am Ende dieser außergewöhnlichen und komplizierten Phase nach dem Zweiten Weltkrieg, hat sich die Chemie und vor allem die akademische Chemie immens ausgebreitet. Es gibt mittlerweile eher zu viele als zu wenige Universitäten mit dem Anspruch zu forschen, und in manchen Ländern steht zu wenig Geld zur Verfügung, um individuelle, isolierte Programme auf einem produktiven

Niveau zu unterhalten. Im Allgemeinen ist die akademische Chemie aber nicht unterfinanziert; die finanzielle Förderung durch die meisten Regierungen ist kontinuierlich gewachsen, wenn auch ungleich und stark vom Zustand der Wirtschaft abhängend, und das Verhältnis zwischen finanzieller Förderung und Forschern ist ebenfalls geschrumpft.

Das System von Anreizen, das sich in der universitären Welt etabliert hat, hat sich während der letzten 50 Jahren nicht sehr verändert und bevorzugt immer noch kleine, konkurrierende Forschungsgruppen, wobei die Vergabe der Fördermittel per Peer-Review-Prinzip geregelt wird. Die Entscheidung über Festanstellungen („Tenure“) und Beförderungen basiert immer noch stark auf der Beurteilung *individueller* Wissenschaftler: Universitäten trauen sich nicht, selbst den „kreativen“ Beitrag einer einzelnen Person zu einer Kollaboration zu beurteilen. Der Prozess, der genutzt wird, um eine Anstellung auf Lebenszeit zu erteilen, hängt immer mehr von Zahlen ab, die einfach von Computern berechnet, aber schwer von Menschen interpretiert werden können (Preise, Veröffentlichungen, eingeworbene Gelder, „h-Index“). Dieser Beurteilungsstil bevorzugt Forschung in etablierten (und dicht besetzten) Disziplinen, in denen es etablierte Gruppen von „Peers“ mit Meinungen zur Qualität der Arbeit gibt – exploratorische Forschung hat es in diesem Umfeld dagegen weitaus schwerer. Das System bevorzugt außerdem einen Forschungsstil, bei dem kleine isolierte Forschungsgruppen im Zentrum stehen, nicht jedoch große Kollaborationen, wie sie normalerweise nötig sind, um die „großen Probleme“ anzugehen.

Tribalismus und konkurrierende Disziplinen: Eine (wahrscheinlich unvermeidbare) Nebenwirkung einer Struktur der akademischen Chemie, die nicht-kooperierende, individuelle Forschungsgruppen bevorzugt, ist das Hervortreten eines auf technischen Spezialfächern basierenden Tribalismus. Chemiker identifizieren sich selbst gewöhnlich als Mitglieder spezialisierter Gruppen: „organische Synthesechemiker“, „bioanorganische Chemiker“, „Oberflächenchemiker“, „Massenspektrometrische Chemiker“, „physikalisch-organische Chemiker“ oder was auch immer für Chemiker. Ob diese Gruppen in der Tat *Granfalloons* (in Kurt Vonneguts klassischer Definition)^[*] sind, oder ob es ihre Funktion ist, Informationen zu verbreiten, um finanzielle Unterstützung, um Studenten oder um Platz zu konkurrieren, ist unklar. Sie stellen jedoch ein Hindernis für einen Studenten dar, der in einem Gebiet, das nicht in eine der historisch anerkannten Disziplinen passt, arbeiten möchte, z.B. in der Nachhaltigkeitsforschung, in der Forschung über Klimawandel oder Energieeinsparung, in der Gesundheitsforschung (Public Health) oder in der Erforschung komplexer Systeme. Und Stämme bekriegen sich im Allgemeinen aus Prinzip.

Die Chemische Industrie. Vom Partner bei Entdeckungen zum Spezialisten der Produktentwicklung. Vor der Erfindung der Forschungsuniversität war die chemische Industrie das Herz der Chemie. Ihre Rolle als Produzent von Kraftstoffen

und Chemikalien im kommerziellen Maßstab ist gut verstanden und geschätzt. Ihre Rolle als kreative Kraft hinter Erfindungen ist bisweilen weniger anerkannt, und eine der bedauernswerten Veränderungen in der chemischen Industrie ist ihr langsamer, aber stetiger Rückzug von einer langfristig angelegten Grundlagenforschung. In ihrer Blütezeit verkörperte die Forschung in der chemischen Industrie einen Forschungsstil, bei dem Wissenschaftler und Ingenieure zusammen große und sowohl kommerziell als auch sozial wichtige Probleme angingen, für die es keine Lösungen gab; die wissenschaftlichen Grundlagen und die Technologien, die man zur Lösung dieser Probleme benötigte, wurden in solchen Projekten erst erarbeitet. Beispiele für fünf Gebiete, die zum großen Teil in der Industrie erfunden und entwickelt wurden, sind die heterogene Katalyse, die Polymerproduktion samt Monomersynthese, die pharmazeutische Chemie der niedermolekularen Verbindungen, die metallorganische Chemie, viele Teile der Elektrochemie samt Energiespeicherung, die Materialwissenschaften und wesentliche Teile der Oberflächenwissenschaften. Das DuPont Central Research Laboratory unter der Leitung von Earl Muetterties und George Parshall war z.B. für viele Jahre eines der Zentren der metallorganischen Grundlagenforschung in der Welt.

In der ersten Hälfte der Nachkriegszeit war die Industrie den Universitäten ein ebenbürtiger Partner bei der Entwicklung neuer Gebiete in der Chemie; in der zweiten Hälfte hat ökonomischer Druck – und ein Rückgang an Gelegenheiten, die als wirtschaftlich realisierbar eingeschätzt wurden – dazu geführt, dass sich die Industrie zunehmend auf kurzfristige Produktentwicklungen konzentrierte anstatt aktiv in Richtung neuer Gebiete in der großtechnischen Chemie zu forschen.

Die Ursachen, die große Firmen zu einem Ausstieg aus der langfristigen Forschung zwang, sind relativ einfach zu verstehen: Die Regeln des Kapitalismus und der freien Marktwirtschaft, aber auch das Anreizsystem für Unternehmensführungen, bewirken eine Bevorzugung solcher Investitionen, für die kurzfristig ein finanzieller Ertrag erwartet werden kann. Forschung ist im Allgemeinen eine langfristige Investition. Die Frage, ob der kurzfristige Ansatz der beste für Firmen und Aktionäre ist, ist nicht leicht zu beantworten;^[6] würde die chemische Industrie expandieren und würden ihre Profite auf erfolgreicher Forschung basieren, könnte sie handeln wie sie wollte. Unter dem Profitabilitätsdruck hat sich ein großer Teil der Industrie entschlossen, existierende Geschäftsfelder zu optimieren, anstatt neue zu schaffen: Forschung wird heute in der chemischen Industrie oft nur unter dem Kostenaspekt, nicht als Investition gesehen.

Diese strategische Ausrichtung der chemischen Industrie hatte mehrere Konsequenzen: 1) Sie hat der einzigartigen und für beide Seiten förderlichen intellektuellen Partnerschaft zwischen industrieller und akademischer Chemie, die die Zeit von den 60ern bis in die 80er Jahre ausgezeichnet hat, ein Ende bereitet, oder zumindest in Umfang und Charakter stark beschränkt (Abbildung 3). 2) Sie hat die Zahl der Arbeitsplätze für Chemiker in der Industrie beschnitten und für angehende Studenten eine Laufbahn in der Industrie weniger attraktiv werden lassen. 3) Sie hat die Optionen der Chemie, neue Gebiete zu erkunden, eingeschränkt, da viele dieser

[*] Ein *Granfallooon* „... ist eine Gruppe von Menschen, die eine gemeinsame Identität oder Absicht vortäuschen, deren wechselseitige Verbindung aber bedeutungslos ist.“ (K. Vonnegut, *Katzenwiege*, und Wikipedia).

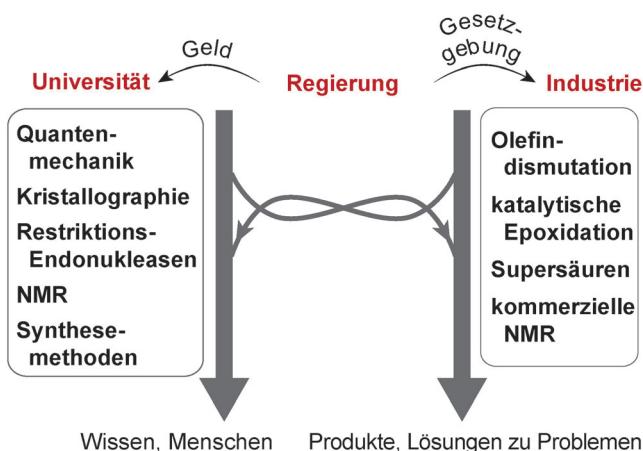


Abbildung 3. Das Wechselspiel zwischen akademischer und industrieller Forschung wird manchmal zu einem linearen Prozess vereinfacht. Die akademische Forschung *entdeckt* und *versteht* neue Phänomene („neugiergetriebene Forschung“), und die industrielle Forschung *kommerzialisiert* diese Phänomene. Die Wirklichkeit ist sehr viel komplizierter. Vor allem in der Chemie haben *beide* zu Entdeckungen und Erfindungen beigetragen, obwohl Universitäten tendenziell „akademischer“ forschen (Mechanismen verstehen, komplexe Synthesemethoden entwickeln, Modellsysteme verstehen, neue Analyseverfahren entwickeln und validieren), während die Industrie typischerweise großangelegte mehrstufige Synthesen optimieren und die für die Kommerzialisierung notwendige kapital- und entwicklungsintensive Produktentwicklung vorantreibt. Die universitäre Forschung hat, um nur ein paar Beispiele zu nennen, die Quantenmechanik, die Kristallographie und die Molekularbiologie hervorgebracht, die sowohl in der akademischen als auch in der industriellen Forschung unverzichtbar geworden sind. Die Industrie hat die ersten Beispiele von Olefindismutationen entdeckt, deren Entwicklung zu einer breiten, nützlichen Klasse von Reaktionen für komplexe organische Synthesen fand dann an Universitäten statt (durch Grubbs, Schrock und andere). Die Beobachtung der Azidität der $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Trägermaterialien für Cracking- und Reforming-Katalysatoren durch Erdölfirmen hat, zum Teil, Olahs Arbeiten über flüssige Supersäuren inspiriert. Die Kernspinresonanz als Phänomen wurde an der Universität entdeckt (durch die Physik), wäre aber ohne die immensen konzeptuellen und technischen Entwicklungen kommerzieller Instrumentenhersteller niemals zu dem unersetzlichen Werkzeug – NMR-Spektroskopie – für die organische und Biochemie geworden, das es heute ist.

Gebiete Ressourcen und Fähigkeiten benötigen, wie sie nur eine mit Großprojekten erfahrene Industrie bereitstellen kann. Solche Gebiete wären z.B. die Erforschung poröser Materialien unter hydrostatischem Druck (besser bekannt als „Fracking“), die Chemie von CO_2 insbesondere im Hinblick auf Sequestrierungsverfahren, das Steuern von Material-, Energie- und Informationsströmen in Städten oder die Entwicklung neuer Strategien zur Nutzung von Sonnenenergie. Die Industrie setzt noch auf einige große Forschungsprojekte, z.B. die biotechnologische Gewinnung von Kraftstoffen und Spezialchemikalien, doch diese werden rasch weniger und sind längst nicht mehr so nötig wie frühere Großprojekte. Sogar die Pharmaindustrie, die lange ein großer Nutzer und Entwickler der organischen Synthese war, betrachtet die Synthese zunehmend nur noch als nützliche Technik, die man einkaufen kann. Im Fokus der Pharmaforschung stehen heute die organismische und Pathobiologie – von dort verspricht

man sich neue Produkte und Dienstleistungen, die man verkaufen kann.

Der verengte Fokus der Industrie auf die Erhaltung der Profitabilität von Standardproduktlinien in einem Geschäftsumfeld, in dem Kosten aufgrund gesetzlicher Vorgaben (vor allem für Umwelt- und Sicherheitsaspekte) immer mehr ansteigen, hat noch eine andere wichtige Konsequenz. Es entsteht nämlich der Anschein, dass die chemische Industrie nicht an einer Forschung interessiert ist, deren Ergebnis einen sozialen anstatt finanziellen Nutzen hat. Es gibt eine große Bandbreite von Problemen – Schonung der Umwelt, nachhaltige Verfahren, Senkung von Gesundheitskosten, nationale Sicherheit (z.B. Abwehr von chemischem und biologischem Terrorismus; neue Krankheiten) –, an deren Lösung Gesellschaften ein substanzielles Interesse haben, die aber kein kurzfristiges Profitabilitätspotential bieten oder die Entwicklung völlig neuer Geschäftsmodelle erfordern. In einigen wenigen Fällen war es möglich, eine Produktentwicklung zu rechtfertigen, die auf gesellschaftlichem Nutzen und den damit verbundenen Imagegewinn abzielte, Zugänge zu neuen Geschäftsfeldern eröffnete und dem Eindruck entgegenwirkte, Unternehmen agierten ausschließlich zum finanziellen Eigennutz. Ihr ansonsten generelles Desinteresse an einem gesellschaftlichen Nutzen hat die chemische Industrie in ein Licht gerückt, ein notwendiger, wertvoller, aber nicht unbedingt attraktiver Teil der Wirtschaft zu sein. Auf lange Sicht dürfte diese Strategie nicht die beste sein.

Genauso wie die Forschungsuniversitäten (wenn auch aus völlig anderen Gründen) ist also die chemische Industrie konservativer, finanziertorientierter und weniger explorativ geworden. Sie versucht, so viel Nutzen wie möglich aus den zuletzt erschlossenen Geschäftsfeldern zu ziehen, die widersprüchlichen Ratschläge zum Thema „Innovation“, mit denen sie überflutet wird,^[7] zu verstehen, und zu überlegen, wie und ob sie an dem, was auch immer als nächstes kommen mag, teilhaben kann.

Regierung. Die Regierung spielt eine komplexe – und oft geschmähte – Rolle im Chemiebetrieb. Sie stellt die Finanzierung für einen großen Teil der akademischen Forschung zur Verfügung, sie lenkt die Industrie durch Gesetze, Anordnungen und Steuern, und sie sorgt für Einnahmen als Käufer von Dienstleistungen und Produkten. Zu einer der interessantesten Entwicklungen in der Beziehung zwischen Regierung und Universitäten kam es beim Peer-Review-System. Dieses wurde ursprünglich eingeführt, um die Verantwortung über der Vergabe von Fördermitteln – für individuelle Projekte entsprechend ihrer Qualität – in die Hand von Wissenschaftlern anstatt von Bürokraten zu legen. Zwei Dinge sind dabei im Laufe der Zeit schiefgegangen. Erstens wird das Peer-Review-System, das auf Eliteforschung ausgerichtet war, heute auch in der „Massenforschung“ angewendet (der Gebrauch des Wortes „Elite“ ruft bei politisch korrektfühlenden Menschen einen Schauer hervor). Ich würde argumentieren, dass Wissenschaft in ihrem Kern eine elitäre Aktivität ist: Nicht jeder kann es, nicht jeder kann es beurteilen, und nur ungewöhnliche Menschen können es wirklich gut. Diese Sicht der Dinge beißt sich mit jener, die besagt, dass wissenschaftliche Fördergelder – weil sie ja breit gestreut vom Steuerzahler kommen – breit verteilt werden sollen, und

zwar in einem Peer-Review-Prozess, der demographisch repräsentativ und anonym ist. Zweitens setzen Regierungen Prioritäten, welche Technologiefelder zu fördern sind, und sie meinen berechtigt zu sein, die Forschung in diese prioritäre Bereiche zu dirigieren. Prioritäten zu setzen, ist zweifellos richtig; die Frage, ob regierungsmäßliche Forschungsprogrammleiter auch kompetente „Forschungsdirektoren“ sind, ist diskussionswürdiger. Dessen ungeachtet hat sich das Peer-Review-System fortentwickelt von einem System, das „die akademische Forschung dem Zugriff behördlicher Bürokraten entzieht“, zu einem, das der „behördlichen Bürokratie dient, um akademische Forschung zu steuern“.

Die Regierung, bei all ihren Idiosynkrasien, erfüllt aber manchmal immer noch eine andere unerlässliche und zunehmend unbeachtete Funktion, nämlich solche Forschungsaktivitäten zu schützen und zu unterstützen, die eine soziale anstatt einer finanziellen Rendite abwerfen, oder die einen langen Atem erfordern. Unglücklicherweise kann eine Forschung im Labormaßstab – ob nun in der Universität oder der Industrie – eine neue Technologie nicht selbst in die Praxis bringen; die Umsetzung in großem Stil zum Wohle der Gesellschaft erfordert fast immer eine industrielle Beteiligung. Die Regierung kann Programme starten und am Laufen halten, aber es ist normalerweise die Industrie, die Produkte – einen Nutzen für die Gesellschaft – anbietet; Die akademische Forschung kann in allen Phasen wertvolle Erkenntnisse beitragen.

Was kommt als Nächstes? Riesige Chancen – aber in neuen Problemfeldern

Aus der außergewöhnlichen Ära der 50er bis 80er Jahre kommend, hat die Chemie einen besonderen intellektuellen und organisatorischen Stil erworben. Und obwohl dieser Rahmen sicher noch immer Chancen bietet, gibt es viele – in der Gesellschaft allgemein und wahrscheinlich auch die meisten Chemiker –, die meinen, dass Chemie weniger interessant ist als Biomedizin, Hirnforschung, „Social Engineering“ (eine Kreuzung von Computerwissenschaften, Elektronik, Soziologie und Marketing), Klimaforschung, Astronomie und einige andere Felder. Durch die anhaltende Evolution der chemischen Industrie zu einem Anbieter von Massenprodukten und Dienstleistungen bleibt sie zweifellos essenziell, aber nicht aufregend. Heißt das, die Chemie hat keine Zukunft?

Nein, natürlich nicht! Ein Blick auf die Probleme, vor denen die Gesellschaft – auf welchem Niveau in der Welt auch immer – steht, und darauf, dass die Lösung dieser Probleme Chemiekenntnisse erfordert, verweist auf genau das Gegenteil. Aber die Strukturen, die in der Vergangenheit so dienlich waren, werden es in der Zukunft nicht mehr sein. Was heute „Chemie“ genannt wird, könnte vielleicht nur noch ein entfernter Cousin der Chemie in 50 Jahren sein.

Eine Veränderung ist, dass einige der Gelegenheiten für die Chemie heute dringende Notwendigkeit sind. Akademikern ist nicht wohl, wenn sie mit „Lieferfristen“ konfrontiert werden. Einige Probleme, vor denen die Gesellschaft steht (Klimawandel, Management von Energieproduktion und

-verbrauch, Kostensenkung im Gesundheitswesen und „Gesundheit für alle“), müssen unverzüglich aufgegriffen werden, und das Finden von Lösungen ist dringend. Die Beantwortung anderer, weniger drängender Fragen, z.B. die nach der molekularen Grundlage des Lebens, wird gänzlich von Neugier getrieben sein, obwohl auch die Beschäftigung mit ihnen – in einer unbestimmten Zukunft – Wege zu neuen Technologien (und Arbeitsplätzen) eröffnen wird. Während es viele Probleme gibt, für die die Chemie die Disziplin mit der plausibelsten Expertise ist, stellt sich die Frage, wie die Beteiligten (Forschungsuniversitäten, Industrie, Regierungen und Stiftungen) Prioritäten setzen? Wer wird was tun, und in welcher Reihenfolge? Wie lange wird es dauern? Tabelle 1

Tabelle 1: Was kommt als Nächstes?

Neue Klassen von Problemstellungen
1) Was ist die molekulare Grundlage des Lebens, und wie ist Leben entstanden?
2) Wie denkt das Gehirn?
3) Wie funktionieren dissipative Systeme wie Ozeane und Atmosphäre, Stoffwechsel und Flammen?
4) Wasser und seine einzigartige Rolle für das Leben und die Gesellschaft.
5) Rationales Wirkstoffdesign.
6) Information: Von der Zelle und dem Gesundheitswesen zu Megastädten und globaler Überwachung.
7) Gesundheitsversorgung und Kostenreduktion: Lebensende oder gesundes Leben?
8) Das Mikrobiom, Ernährung und andere, versteckte Gesundheitsfaktoren.
9) Klimainstabilität, CO ₂ , die Sonne und menschliches Handeln.
10) Energie: Erzeugung, Transport, Verbrauch, Speicherung, Einsparung.
11) Katalyse, speziell heterogene und biologische Katalyse.
12) Computersimulation und -modellierung von realen, großen Systemen.
13) „Unmögliche“ Materialien.
14) Die Chemie der Planeten: Sind wir allein oder ist Leben überall?
15) Augmentierung des Menschen.
16) Analysetechniken, die neue Gebiete der Wissenschaft erschließen.
17) Internationale Konflikte und nationale Sicherheit.
18) Gesellschaftliche Verteilung von technologischen Wohltaten: „Spartechnologie“.
19) Menschen und Maschinen: Robotik.
20) Tod.
21) Bevölkerungskontrolle.
22) Verdrahtung von Mensch und Computer.
23) Der ganze Rest: Arbeitsplätze, Globalisierung, internationaler Wettbewerb, Big Data und mehr.
24) Verzahnung mit Nachbardisziplinen.

enthält Beispiele für Herausforderungen.^[8] Einige sind offensichtlich. Einige sind „unvermeidbar“ in dem Sinne, dass es sicher ist, dass die Probleme real sind und in irgendeiner Form angegangen werden – die Frage ist nur wie. Einige kommen auf, indem man einfach annimmt, dass das allgemeine Wissen falsch ist. Andere sind meine rein persönliche Meinung.

Obwohl ich die in dieser Tabelle genannten Probleme daraufhin ausgewählt habe, dass sie illustrieren, was Chemiker in der Zukunft wissen sollten, würden viele Leute ähnli-

che Listen konstruieren. Lassen Sie mich die einzelnen Punkte kurz diskutieren, da der Bezug zur „Chemie“, wie sie sich momentan selbst definiert, für manche nicht unmittelbar offensichtlich sein dürfte. Und wenn manche dieser Beispiele momentan mehr an Science-Fiction erinnern als an den üblichen Inhalt einer Zeitschrift wie der *Angewandten Chemie*, stellen Sie sich vor, wie aberwitzig den Menschen vor 100 Jahren Vorschläge erschienen wären, die menschliche Lebewesenwartung zu verdoppeln, das Internet aufzubauen (was immer das auch hätte sein sollen), Polio und Pocken auszurotten, die molekulare Struktur eines biologischen Ensembles, das man „das Ribosom“ nennen sollte, zu bestimmen, oder den Mars zu erkunden, indem man Roboter mittels computergesteuerter Raketen schickt. Alles ist so eingetreten! Die Chemie tendiert zu übertriebener Bescheidenheit in ihren Ambitionen, übertriebener Ehrgeiz könnte manchmal die bessere Strategie sein!

1. Was ist die molekulare Grundlage des Lebens, und wie ist Leben entstanden? Ist das Verstehen von „Leben“ nicht ein Thema, das in das Gebiet der Biologie fällt (Abbildung 4)? Nein. Leben ist eine Ausdrucksform der molekula-

Flamme wissen wir beim Leben nicht, wie es begonnen hat. Ein Funke entfacht eine Flamme in einer Mischung aus Sauerstoff und Methan in der richtigen Konzentration. Wie könnten sich die viel komplizierteren Komponenten des Lebens selbst zusammenfügen, in dem desorganisierten Chaos der präbiotischen Erde, und die noch viel komplizierteren Reaktionsnetzwerke hervorbringen, die wir die Zelle nennen? [9]

2. Wie denkt das Gehirn? Dass Leben einfach auf das Verhalten von Molekülen zurückgeführt werden kann, ist beunruhigend; dass dies auch für menschliches Denken gilt, ist noch beunruhigender. Ja, es gibt die detaillierten und faszinierenden biochemischen Fragen bezüglich Neurotransmittern und -rezeptoren, Proteinsynthese und elektrochemischer Transmembranpotentiale, aber die tiefer liegende Frage – eine wahrscheinlich eher an der Grenze zwischen Chemie, Erkenntnistheorie und Physik als zwischen Chemie und Biologie – betrifft die Grundlage von Gefühlen und Selbsterkenntnis. Ist Denken – ist Bachs „Wohltemperiertes Klavier“ – einfach molekulares Verhalten (wenn auch von der komplizierten Sorte)? Oder gibt es da noch etwas anderes? Übersehen wir etwas Fundamentales? Ich will nicht das Interesse an Diskussionen über „Emergenz“ als „etwas Neues“ gegenüber dem „unvollkommenen Verständnis“ von komplexen Systemen bagatellisieren, nur abermals betonen, dass die empirische Grundlage des „Denkens“, soweit wir es jetzt wissen, einfach wechselwirkende Moleküle und daher Chemie sind.

3. Wie funktionieren dissipative Systeme wie Ozeane und Atmosphäre, Stoffwechsel und Flammen? In der Chemie neigen wir dazu, Systeme im chemischen Gleichgewicht (oder in Bewegung darauf zu) zu untersuchen. Diese erschien kompliziert genug. Aber die interessantesten Systeme in der uns umgebenden Welt – Leben, Denken, Verbrennungsvorgänge, Ökosysteme, Verkehr, Epidemien, der Wertpapiermarkt, die planetarische Umwelt, Wetter, Städte – sind „dissipativ“; das bedeutet, dass ihre charakteristischen und interessantesten Merkmale nur unter Energiezufluss auftreten. [10] Das Studium dissipativer Systeme war natürlich über Jahrzehnte hinweg ein Gegenstand der Naturwissenschaften, aber im Gegensatz zu Systemen im Gleichgewicht, ist das Verständnis von dissipativen Systemen – sowohl theoretisch als auch empirisch – immer noch sehr bescheiden.

4. Wasser und seine einzigartige Rolle für das Leben und die Gesellschaft. Wasser ist eine erstaunliche Flüssigkeit, es existiert nichts Vergleichbares. Das Verstehen von Wasser ist immens wichtig auf beinahe jeder Ebene, von einer sehr praxisnahen bis zur einer sehr konzeptionellen. Wie wird es möglich sein, der Menschheit ausreichend Trinkwasser bereitzustellen – und die sehr viel größeren Mengen, die zur Bewässerung von Pflanzen benötigt werden, zumal in Anbetracht von Klimawandel und der begrenzten Energie, die zur Erzeugung und zum Transport des Wassers zur Verfügung steht? Warum ist Wasser diese einzigartige Flüssigkeit, in der Leben stattfindet? Welche Rolle spielt Wasser in den unzähligen Prozessen – von der Katalyse bis zu molekularer Erkennung –, die den Stoffwechsel in einer Zelle bilden? [11] Es ist bemerkenswert, dass die meisten Diskussionen in der Biochemie sich so gezielt auf die organischen Moleküle in der

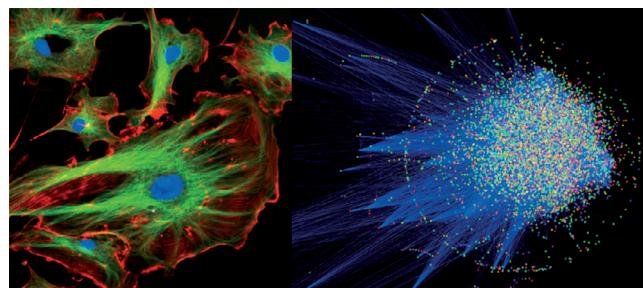


Abbildung 4. Links: Eine Zelle mit fluoreszierenden Markierungen von Teilen ihrer inneren Struktur. Rechts: Diagramm eines Interakts: Punkte repräsentieren Proteine, Linien Interaktionen zwischen ihnen. Das Netzwerk von Interaktionen – und, wahrscheinlich am wichtigsten, die regulatorische Kontrolle der katalytischen Aktivität von Enzymen durch Metabolite und Signalmoleküle – ist sehr viel komplizierter als in diesem Diagramm angedeutet und weit jenseits unseres momentanen Verständnisses von komplexen dissipativen Systemen.

ren Chemie – ein bemerkenswertes Netzwerk von Molekülen, Katalysatoren und Reaktionen. Es handelt sich um eine Chemie, die auf eine Weise funktioniert, die wir (oder zumindest ich) nicht verstehen. Die Zelle besteht aus reagierenden und wechselwirkenden Molekülen. Die Moleküle sind nicht lebendig; die Reaktionen sind nicht lebendig; wie wird dann die Zelle lebendig? Die Antwort auf diese Frage erscheint auf eine nicht-offensichtliche Weise offensichtlich: „Leben“ scheint der Name zu sein, den wir dem erstaunlichen Verhalten einer bestimmten Auswahl von Reaktionen geben, die in einer beschränkten Umgebung ablaufen, welche „die Zelle“ genannt wird. Es ist wie eine Flamme, nur sehr viel komplizierter. Eine Flamme verbrennt Sauerstoff und Methan und erzeugt Hitze und Licht. Eine Zelle „verbrennt“ Sauerstoff und Glukose, erzeugt Hitze und produziert eine weitere Zelle. Und in noch einem Punkt ist Leben sehr viel schwieriger zu verstehen als eine Flamme: Anders als bei der



Abbildung 5. Eine der neuen Konstruktionen der Menschheit ist die „Megastadt“, eine Stadt mit einer Bevölkerung von mehr als 50 Millionen Menschen. Damit solche Städte funktionieren, benötigt man sowohl Wissen als auch Technologie. Probleme gibt es auf vielen Ebenen: die Ströme von Wasser, Nahrung, Baustoffen, Energie, Wärme, Abgasen und Müll; Krankheitsbekämpfung; das Management von Bildung, Selbstverwaltung und „Gerüchten“, die Bekämpfung von Unruhen und Verbrechen. Die Chemie besitzt einzigartige Erfahrungen im Herstellen von Sensoren und im Umgang mit großen Sensorsystemen, im Transport von Materialien, Energie und Müll und in der Entwicklung von Technologien für Nachhaltigkeit und öffentliche Gesundheit. Aufgrund ihrer Erfahrung bei der Modellierung großer Zahlen interagierender Moleküle und Partikel, z.B. aus der statistischen Mechanik und der Kolloidwissenschaft, hat sie der Soziologie und verwandten Gebieten, die sich mit einer großen Zahl interagierender Menschen befassen, vielleicht mehr anzubieten, als man erwarten würde. (Foto links: David Iliff. Lizenz CC-BY-SA 3.0. Foto rechts: YGLvoices. Lizenz: CC-BY-2.0).

Zelle konzentrieren und zugleich Wasser, das der Hauptbestandteil von lebenden Systemen ist, außer Acht lassen: Konzeptionell diskutieren wir Leben oft, als ob es in einem Vakuum stattfände. Obwohl die Computerchemie nun ein Niveau erreicht hat, auf dem sie zum Verständnis von Wasser beitragen kann, verstehen wir immer noch einen Großteil des Rätsels Wasser nicht.

5. Rationales Wirkstoffdesign. Das so genannte „rationale Wirkstoffdesign“ ist seit Jahrzehnten ein bekanntes Problem. Eines der Versprechen der Genomik war es, dass sie einen Prozess hervorbringen würde, in dem die Sequenzierung des Genoms eine Vorhersage der Aminosäuresequenz eines Proteins erlauben würde; aus der Sequenz könnte man die Tertiärstruktur des Proteins vorhersagen; aus der Proteinstruktur könnte man das aktive Zentrum identifizieren; und mit dem dreidimensionalen Modell des aktiven Zentrums könnten Chemiker schließlich fest bindende Liganden konzipieren und synthetisieren. Bisher gelingt nur der erste Schritt, die Sequenzierung, nach 50 Jahren Bemühungen. Einen Wirkstoff herzustellen, ist natürlich viel komplizierter als einen fest bindenden Liganden herzustellen, aber die Fähigkeit, Liganden „rational“ zu konzipieren, wäre enorm hilfreich. So haben wir, nach jahrzehntelanger Arbeit äußerst fähiger Forscher, eine Lösung dieses Problems noch immer nicht in Händen. Es hat sich als so schwierig erwiesen, dass ich mich – in Anlehnung an den Wissenschaftstheoretiker Thomas Kuhn – fragen muss, ob unser Verständnis des Problems nicht ein wesentliches Element übersieht.^[12]

6. Information: Von der Zelle und dem Gesundheitswesen zu Megastädten und globaler Überwachung. Da Computersimulationen so leistungsfähig und erschwinglich geworden

sind, gibt es einen Trend, jede Art von Information als binäre Bitfolge aufzufassen.^[13] Es ist nicht klar, wie man in all den Problemen, mit denen sich die Chemie beschäftigt, „Information“ am besten beschreiben soll. Die oft gehörten Fragen „Was ist der Informationsgehalt eines aktiven Zentrums?“ oder „Was ist der Informationsgehalt einer Zelle?“ oder „Wieviel Information ist notwendig, um das weltweite Klima zu modellieren?“ lassen sich vermutlich nicht durch eine Bitfolge ideal beantworten. Ebenso gilt auch für andere, fundamental empirische Fragen, die in der Chemie reichlich vorhanden sind. Wenn wir z.B. das globale Klima überwachen wollen, oder die Material-, Energie-, Abfall-, Menschen- und Krankheitsströme hinein und heraus aus einer Megastadt (Abbildung 5): Wie soll die Auswahl an Sensoren aussehen, wie soll die enorme Menge an generierten Daten verarbeitet und interpretiert werden? Fragen bezüglich der Generierung, Sammlung und Verwendung von Information in komplexen, physikalischen Systemen sind natürlich nur partiell an die Chemie adressiert. Die Chemie verfügt aber wahrscheinlich über die tiefsten fundamentalen Kenntnisse ihrer physikalischen Grundlagen und über die zur Sammlung relevanter Daten genutzten Methoden und wird daher eine essenzielle Rolle bei der Beantwortung dieser Fragen spielen.

7. Gesundheitssystem und Kostenreduktion: Lebensende oder gesundes Leben? Die in der entwickelten Welt vorherrschenden Gesundheitssysteme haben einen profitorientierten Fokus auf der Behandlung bekannter Krankheiten, üblicherweise am Lebensende.^[14] In Wirklichkeit ist der Anstieg der Lebenserwartung, den wir im letzten Jahrhundert genießen durften, größtenteils nicht auf medizinische Hochtechnologie, sondern auf Verbesserungen der „öffentlichen

Güter“ zurückzuführen: sauberes Wasser, Eindämmung der Umweltverschmutzung, Airbags, Ampelanlagen, sichere Lebensmittel, Antibiotika, Schutzimpfungen und sogar ein fairen Rechtssystem. Ein Fokus auf „gesundes Leben“, gekopelt mit einer Kostenreduktion der Gesundheitssysteme, der Entwicklung neuer Technologien für die öffentliche Gesundheit und einer Verfügbarkeit für alle sozialen Schichten, ist voll und ganz im Aufgabenbereich der Chemie und eine zentrale Zielsetzung der meisten Gesellschaften.

8. Das Mikrobiom, Ernährung und andere, versteckte

Gesundheitsfaktoren. Der gegenwärtige Begeisterung für die Erforschung des Mikrobioms^[15] – der „Bazillen in unseren Eingeweiden“ – und seiner Rolle für die menschliche Gesundheit mag anhalten oder auch nicht, aber die Idee, dass es versteckte Variablen gibt – Ernährung, sportliche Betätigung, Umwelteinflüsse, komplexe Vererbungsmuster und Anfälligkeit –, die nicht ein zentraler Teil der gegenwärtigen Paradigmen (oder Dogmen) von „Diagnose und Behandlung“ sind, bietet eine weitere Auswahl an fundamentalen Problemstellungen, zu deren Bearbeitung die Chemie beitragen kann.

9. Klimainstabilität, CO₂, die Sonne und menschliches

Handeln. Das vermutlich dringendste wissenschaftliche Problem, dem die Menschheit momentan gegenübersteht, ist, den Einfluss menschlichen Handelns auf die Umwelt zu verstehen. Die dringendste technologische Frage ist, was man tun kann. Das Problem ist praktisch und wirtschaftlich außerordentlich wichtig, und es ist wissenschaftlich immens kompliziert. Eines der Mantras der Betriebswirte lautet: „Was du

nicht messen kannst, kannst du nicht managen!“ Nun sind Chemiker meisterhaft darin, jene Messungen anzustellen, die man benötigt, um diese Wechselwirkungen zu verstehen. Und sollten wir jemals ernsthaft darüber nachdenken, „Geoengineering“ zu betreiben – die bewusste Modifizierung des globalen Klimas, z.B. durch Injektion von schwefelhaltigen Aerosolen in die Atmosphäre oder durch Auslösung von großflächigen Algenblüten in den Ozeanen –, wird man zur Abschätzung von Risiko und Nutzen die Fertigkeiten der Chemie mit denen vieler anderer Disziplinen, von der Geologie und Ozeanographie bis hin zur Wirtschaft und Politik, kombinieren müssen. Geoengineering würde außerdem ethische Fragen aufwerfen, da Experimente, die die Bewohnbarkeit der Erde beeinflussen, im Falle eines Fehlschlags (wie er bei vielen Experimenten vorkommt) denkbar unglückliche Folgen haben könnten.

10. Energie: Erzeugung, Transport, Verbrauch, Speicherung und Einsparung.

Ein Großteil des menschlichen CO₂-Ausstoßes in die Atmosphäre wird durch Verbrennungsprozesse zum Zweck der Energieerzeugung verursacht (Abbildung 6).^[16] Wiederum hat jeder Aspekt der Erzeugung, des Transports, der Speicherung und der Einsparung von Energie chemische Komponenten, vom Verstehen der sehr interessanten praktischen Anwendbarkeit von bekannten (aber nicht unbedingt sehr gut verstandenen) Prozessen – vom Fracking bis hin zur CO₂-Sequestrierung, und vom Design von Solarkraftanlagen bis zur Lagerung von Atommüll – bis hin zur Erfindung von radikal neuen Ansätzen zur Energieerzeugung und -verwendung. Und noch wichtiger sind die

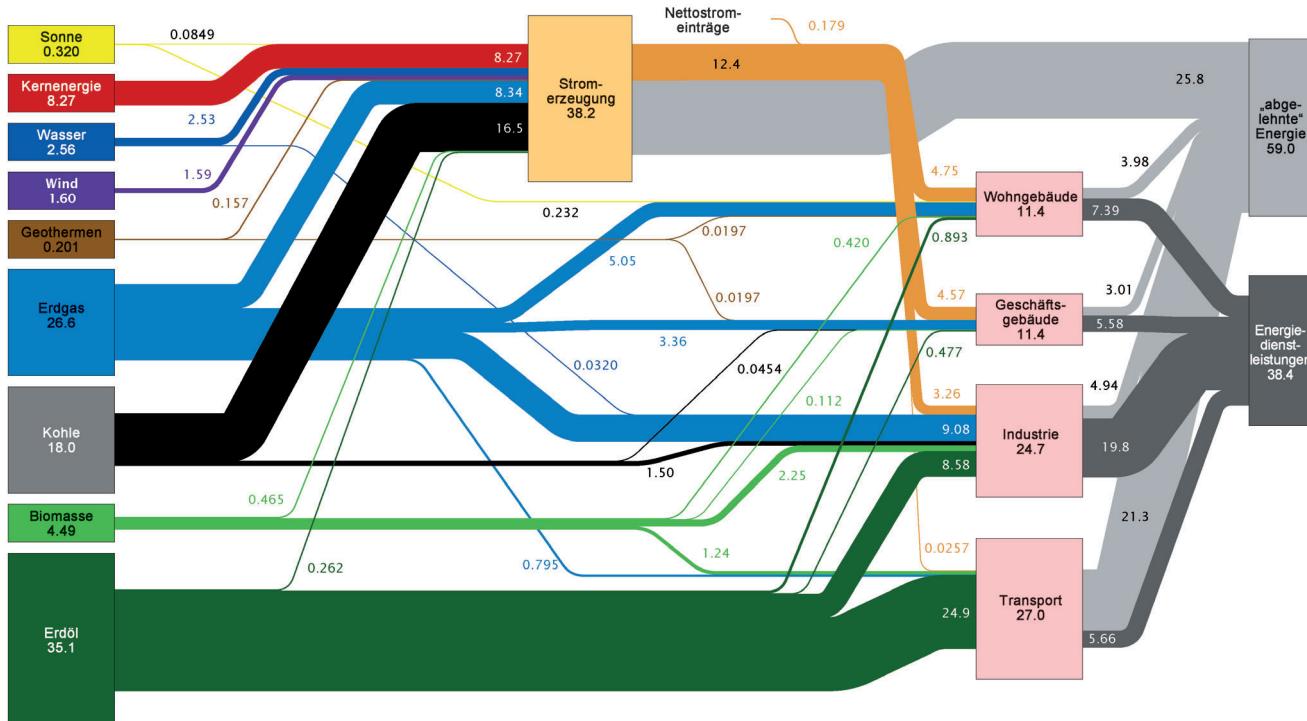


Abbildung 6. Diagramm der Energieströme in den USA. Derartige Ströme variieren von Region zu Region in der Welt, aber jedes Diagramm lässt unzählige Gelegenheiten zum Eingreifen erkennen, von denen viele die Chemie einbeziehen. Die Trägheit großer Energiesysteme ist ebenfalls enorm: Den Umstand zu ändern, dass heute rund 80% der Energie durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe erzeugt wird, wird viele Jahrzehnte erfordern. (Abbildung 6 wurde durch das Lawrence Livermore National Laboratory unter der Förderung durch das US Department of Energy erstellt: <https://flowcharts.llnl.gov/>).

Fragen, wie diese Prozesse und deren Auswirkungen die Ozeane, die Atmosphäre und das Klima beeinflussen.

11. Katalyse, speziell heterogene und biologische Katalyse. Eine der einzigartigen Fertigkeiten der Chemie ist die Katalyse. Im Anbetracht ihrer allgegenwärtigen Bedeutung ist es erstaunlich, wie viel wir immer noch nicht wissen über dieses Gebiet. Obwohl der Haber-Bosch-Prozess zur Ammoniaksynthese (erstmals von der BASF um 1913 kommerzialisiert) den Weg in das heutige „Universum“ an Katalysatoren bereitet hat, verstehen wir immer noch nicht (über ein oberflächliches Niveau hinaus) die Mechanismen der meisten dieser Prozesse, die Treibstoffe, Chemikalien und Materialien erzeugen. Man betrachte nur einmal die Schwierigkeit, einen neuen heterogenen Katalysator zu konzipieren, die Komplexität der enzymatischen Katalyse zu verstehen oder gar katalytische Netzwerke mit Rückkopplungs- und Kontrollmechanismen zu entwerfen, die zwischen verschiedenen Teilen des Netzwerks operieren, so wie es in einer Zelle der Fall ist.

12. Computersimulation und -modellierung von realen, großen Systemen. Werden wir irgendwann in der Lage sein, ausgehend von der molekularen Ebene eine Zelle zu simulieren? Oder einen Ozean? Oder einen Wirkstoff gezielt zu entwerfen, nicht nur einen Liganden? Bei all der Steigerung an Rechenleistung und dem historisch gut begründeten Optimismus, dass mehr Bits zu besseren Ergebnissen führen, stellt sich die Frage nach den Grenzen von Computersimulationen und nach den Vereinfachungen, die geeignet sind, um molekulare und makroskopische Phänomene zu verbinden. Und wird es Alternativen geben zu gegenwärtigen Methoden der digitalen Computersimulation? Quantencomputer? Neue Anwendungen von analogen Computern oder Systeme, die an neuronale Netze erinnern? Neuromorphe Systeme? Schließlich gibt es, über die Computersimulation hinausgehend, die Probleme der Theorie. Gibt es einen analytischen Ansatz zur Lösung jener großen Zahl von gekoppelten nichtlinearen Differentialgleichungen, die das Leben oder Megastädte oder Planeten beschreiben? Wie soll man das Verhalten von komplexen Systemen analysieren, und gibt es tatsächlich eine allgemeingültige Theorie für solche Systeme?

13. Unmögliche Materialien. Wird es möglich sein, irgendwann einen Hochtemperatursupraleiter herzustellen, oder einen transparenten flüssigen Ferromagneten oder eine wirklich biokompatible Neuroprothese? Ein Material, das besser Wärme leitet als Diamant, dabei aber erschwinglich und oxidationstabil ist, wäre äußerst nützlich. Adaptive Materialien, die einige der Eigenschaften organischen Gewebes nachahmen, bieten sich für viele Einsatzmöglichkeiten an. Die meisten „unmöglichen“ Materialien, die man sich vorstellen kann, erscheinen unmöglich, weil sie bis jetzt noch nicht realisiert wurden, nicht weil es einen stichhaltigen theoretischen Grund gäbe, dass sie nicht hergestellt werden können.

14. Die Chemie der Planeten: Sind wir allein oder ist Leben überall? Planetenentdeckung ist ein Gebiet, das vor kurzem einen revolutionären Wandel erfahren hat: Wir wissen jetzt, dass viele (vielleicht sogar die meisten) Sterne Planeten um sich haben und dass einige dieser Planeten

flüssiges Wasser haben werden. Wir werden die Planeten (und deren Monde) unseres Sonnensystems besuchen können, andere Sonnensysteme werden wir in absehbarer Zukunft nicht erreichen. Was werden wir daraus machen können – insbesondere aus der Möglichkeit, dass sie Leben beheimaten könnten, entweder solches, das unserem ähnlich ist, oder vielleicht ganz anders? Wenn „Leben“ ein molekulares Phänomen ist, dann scheint Leben für ein System von Molekülen möglich, das von dem, das zu uns geführt hat, völlig verschieden ist. Und der Rückschluss, Leben sei auf anderen Planeten wahrscheinlich (oder unausweichlich), wäre eine Art zweite kopernikanische Wende: Es würde die Menschheit von einem einzigartigen Platz im Zentrum des Universums verdrängen, auf die sehr viel weniger erhabene Position, eine unter vielen Lebensformen zu sein, auf vielen Planeten, viele Sonnen umkreisend. Von der „Krone der Schöpfung“ zu etwas ganz und gar Gewöhnlichem. Es könnte unserer Demut gut tun.

15. Augmentierung des Menschen. Menschen sind bemerkenswert; vielleicht wären sie augmentiert – „verstärkt“ in welcher Hinsicht auch immer – noch bemerkenswerter. Die künstliche Augmentierung menschlicher Fähigkeiten könnte viele Formen annehmen, wovon die meisten molekulärer und biochemischer Natur wären. Nur ein Beispiel sei genannt: das menschliche Nervensystem funktioniert mittels elektrischer Potentiale, die von Gradienten der Ionenkonzentrationen zwischen dem Zytosol und dem extrazellulären Medium generiert werden; Computer funktionieren mittels elektrischer Potentiale, die von Gradienten der Elektronenkonzentrationen in Schaltkreisen (bestehend aus dotiertem Silicium) generiert werden. Diese zwei Systeme zu verbinden, ist ein atemberaubend schwieriges Problem, mit einer ausgeprägten molekularen Komponente. Eine solche Augmentierung könnte Sinneswahrnehmungen, Erinnerungsvermögen, Informationsverarbeitung und physische Fähigkeiten betreffen. Augmentierung von Verhalten und Emotion wäre ethisch sehr viel komplizierter. Natürlich haben Facebook, Twitter und die anderen Avatare des Social Engineering schon jetzt die Fähigkeit unserer Kinder, zu kommunizieren und Gemeinschaften zu bilden, elektronisch augmentiert (mit allen Vor- und Nachteilen), einige Veränderungen sind also schon im Gange.

16. Analysetechniken, die neue Gebiete der Wissenschaft erschließen. Die analytische Chemie ist ein sehr viel wichtigeres Gebiet als es erscheinen mag. Dyson, Galison und andere haben überzeugend argumentiert, dass einer der wichtigsten Schritte bei der Erschließung neuer Wissenschaftsgebiete die Entwicklung von neuen Analysetechniken ist, die es ermöglichen, relevante Messungen zu machen.^[17] Man bedenke z.B. den unentbehrlichen Beitrag der chemischen Methoden zur Gensequenzierung, der Spektroskopie bis zur organischen Synthese, oder der Laser zu allen möglichen Zwecken. Die Chemie befindet sich immer noch in einer Phase der sehr aktiven Entwicklung neuer Analysetechniken. Und die Analyse des molekularen Verhaltens und von Bewegungen auf subzellulärer Ebene, der Erforschung des Tiefenhirns (besonders beim Menschen) und, am anderen Ende der Größenskala, die Entwicklung der Messinfrastruktur zum Management von Megastädten, Gesundheitssystemen

men und Atmosphären, dies sind allesamt immens interessante und fordernde Probleme.

17. Internationale Konflikte und nationale Sicherheit.

Terrorismus, der von kleinen Gruppen verübt wird, hat sich zu einem Äquivalent konventioneller Kriege und damit zu einem Anliegen der nationalen Sicherheit entwickelt. Obwohl Terrorismus historisch auf vergleichsweise kleine Vorfälle beschränkt war, könnten in Zukunft mögliche Anschläge mit chemischen, biologischen oder Kernwaffen von ganz anderem Kaliber sein. Verteidigung gegen diese Art von Terrorismus bezieht Chemie auf jeder Stufe ein, von geheimdienstlicher Tätigkeit und dem „Management“ eines Terroranschlags bis hin zu Aufräumarbeiten, Forensik und Wiederherstellung des Zerstörten.

18. Gesellschaftliche Verteilung von technologischen Wohltaten: „Spartechnologie“.

Wohltaten: „Spartechnologie“. Die meisten Menschen auf der Erde leben unter Bedingungen, die wir – in der entwickelten Welt – als unerträgliche Armut und Unsicherheit betrachten würden. Eine Teilhabe dieser Gesellschaften an moderner Technologie und in der Folge am Wohlstand – aus ethischen Gründen, oder um regionale und globale Stabilität zu fördern, oder um langfristig Arbeitsplätze und eine breitere Mittelklasse und damit Märkte zu schaffen – erfordert ein Geschäftsmodell, das nicht gut zu einem kurzfristig agierenden Kapitalismus passt. Technologie, die in Entwicklungsländern erfolgreich sein soll, muss das höchstmögliche Verhältnis zwischen Nutzen und Kosten aufweisen (die beide irgendwie gemessen werden). Eine teure Technologie herzunehmen und sie günstig und robust zu machen, ist nicht unkompliziert. Tatsächlich ist es oft am besten, eine gänzlich neue Lösung für ein Problem zu erfinden. Die Chemie hat immer eine Schlüsselrolle in der Erfindung von hochentwickelten und teuren Technologien gespielt; genauso hat sie das Potenzial, eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von sparsamen und breit zugänglichen Technologien zu spielen. Eine Lösung zu einem Problem zu entwickeln, die kostengünstig, funktionell, robust und profitabel ist, ist zumeist schwieriger als eine komplizierte und teure Lösung.^[18]

19. Menschen und Maschinen: Robotik.

Was ist das „nächste große Ding“ in der Technologie (nach dem World Wide Web)? Die Robotik ist ein Kandidat. Es handelt sich um ein Gebiet, das sich im Frühstadium eines explosiven Wachstums befindet. Sie hat das Potential, neue Effizienzen zu schaffen – Fähigkeiten, die die von Menschen weit übertreffen – und uns vielleicht manche der eintönigeren Tätigkeiten des Arbeitslebens abnehmen; genauso hat sie das Potential, Menschen von Arbeitsplätzen zu verdrängen, in einer Zeit, in der Arbeitsplätze ohnehin schon Mangelware sind, den Energieverbrauch zu erhöhen und vielleicht – in Kombination mit „Computerintelligenz“ – ein Art nicht-menschlichen Konkurrenten zu generieren. Herauszufinden, wie man Roboter herstellt, die, unter Minimierung von Kosten und Gefahren, Menschen aus Gefahrensituationen befreien, uns unangenehme Arbeiten abnehmen oder uns als Assistenten unterstützen („kollaborierende Roboter“), ist eine Herausforderung mit vielen Komponenten aus den Materialwissenschaften und der Chemie. Die Entwicklung von neuen Formen der Robotik wird auf jeden Fall auch eine enge Kooperation zwischen der Chemie und den anderen Komponenten

dieses dynamischen und Chemikern recht fremdartigen Forschungsfeldes benötigen.

20. Tod. Wir Sterblichen finden den Tod in einer zwanghaften und fort dauernden Form interessant. Wir betreiben einen enormen Aufwand, ihn zu vermeiden. Was wir jedoch nicht haben, ist eine präzise definierte Vorstellung davon, um was es sich handelt. Was zieht der Tod eines lebenden Organismus wirklich nach sich? Welche molekularen, zellulären und organischen Prozesse sind essenziell für Leben und Tod, und wo ist die Grenze zwischen ihnen? Ist der Tod ein binärer Prozess, ein gradueller oder ein komplexes System solcher Prozesse? Das Verstehen des Todes, wie auch das Verstehen des Lebens, ist eine Thematik, welche die molekulare Wissenschaft auf vielen Ebenen einbezieht, und konzeptuelle, ethische und praktische Auswirkungen haben kann.

21. Bevölkerungskontrolle. Lebensstandard ist, einfach betrachtet, das Verhältnis zwischen Ressourcen und Bevölkerungszahl. Die Kontrolle der Bevölkerungszahl ist ein komplexes Problem, mit Elementen von Verhütung bis Bildung,^[19] und einige Komponenten des Problems beziehen auch die Chemie mit ein. Zum Beispiel bietet die reversible Verhütung beim Mann einen offensichtlichen Weg zur Vermeidung ungewollter Schwangerschaften. Ein weniger offensichtlicher Weg – mit gleichem Ausgang – ist die Eindämmung von Kindersterblichkeit und die Verbesserung der Gesundheit von Kindern; beide Maßnahmen reduzieren die Unsicherheit bezüglich der Zahl der zu bekommenden Babys, die einmal zu gesunden, arbeitenden jungen Erwachsenen heranwachsen, welche die einzige Unterstützung für viele Familien in Entwicklungsländern sind. Noch weniger offensichtlich, aber genauso wichtig, ist die Verbesserung der Trinkwasserversorgung. Die Verfügbarkeit von Trinkwasser befreit viele Mädchen in vielen Gesellschaften von ihrer tradierten Pflicht, Wasser von weit entfernten Quellen zu holen, und ermöglicht ihnen den Schulbesuch. Eine Verbesserung des Bildungsniveaus von Frauen ist eine der besten Methoden zur Eindämmung des Bevölkerungswachstums. Insofern ist die Chemie in viele Aspekte dieses Problems einbezogen, von der medizinischen Chemie bis hin zur Wasserleitung aus PVC.

22. Verdrahtung von Mensch und Computer. Menschen denken, Computer rechnen. Wenn aber Berechnungen komplexer werden, wird es immer schwieriger, eine Unterscheidung zwischen Rechnen und Denken zu treffen. Die Verknüpfung von menschlichem Denken mit der Informationsverarbeitung von Computern und Systemen – sei es einfaches Rechnen oder künstliche Intelligenz –, wird eine physische Kopplung erfordern. Google Glass und ähnliche Systeme mögen ein primitiver erster Schritt sein, aber wie würde ein USB-Anschluss für das Gehirn aussehen? Neben anderen Merkmalen könnte er eine neuronal-elektronische Schnittstelle aufweisen, zu deren Design auf molekularer Ebene wir momentan noch nicht die Befähigung haben.

23. Der ganze Rest: Arbeitsplätze, Globalisierung, internationaler Wettbewerb, Big Data und mehr. Vor dem Hintergrund dieser Probleme rollt ein Tsunami an weiteren Veränderungen auf Wissenschaftler und Ingenieure zu, der auch neue Probleme hervorbringen wird, die es zu lösen gilt. Die Chemie muss lernen, in diesen turbulenten Wassern zu

schwimmen, sonst riskiert sie, unterzugehen. Ein besonders interessanter Aspekt ist die Entwicklung von unterschiedlichen Formen der Wissenschaft in verschiedenen geographischen Regionen. Europa, die USA und Japan waren daran gewöhnt, wenig Konkurrenz vom Rest der Welt zu erfahren. Dieser „Schutz“ verschwindet gerade, und andere geographische Regionen sind dabei, eigene wissenschaftliche Stärken, Kulturen, Ambitionen und Ziele zu entwickeln. In der Chemie dominieren die USA noch immer die Biochemie und angrenzende Gebiete; ein wiederauflebendes China beginnt, signifikante Bereiche der Synthese einzunehmen; ein Schwerpunkt in Indien ist „sparsame Innovation“; Europa ist besonders stark in dem aufkommenden Gebiet der „Systemchemie“. Wohin wird dieser Wettbewerb, der in der nun vergangenen Ära kaum existierte, führen? Was wird dazu kommen, wenn Afrika und Südamerika ihre eigenen wissenschaftlichen Stile entwickeln? Und wie werden regionale Industrien auf die neuen Möglichkeiten reagieren, die sich durch regionale Stärken und Schwächen bieten werden? Mit neuen Technologien und Produkten und mit der Schaffung oder Streichung von Arbeitsplätzen? Die Weiterentwicklung des Internets wird eine treibende Kraft für Umwälzungen bleiben. Jedermanns Information, ob mit Besitztitel oder nicht, wird wahrscheinlich jedem verfügbar sein. Wird dieses (manchmal ungewollte) Teilen innovative chemische Forschung stimulieren oder wird es attraktiver sein, als „schneller Kopierer“ zu agieren?

24. Verzahnung mit Nachbardisziplinen. Manche der Gelegenheiten für die Chemie ergeben sich aus der Wechselwirkung mit neuen intellektuellen Partnern (manche sind offensichtlich, andere nicht). Zum Beispiel fokussieren die Bemühungen in der medizinischen Chemie zur Bekämpfung von Lungenkrebs auf hochtechnologische medizinische Eingriffe – Operationen, Chemotherapie, Bestrahlung, Immuntherapie. Der Erfolg dieser Behandlungsmethoden ist bestenfalls punktuell. Am besten ist es natürlich, Lungenkrebs zu vermeiden: verschmutzte Luft zu säubern, spezifische Umwelteinflüsse zu reduzieren, mit dem Rauchen aufzuhören und vielleicht genetische und umweltbedingte Risikofaktoren zu erkennen. Das Problem ist nicht exklusiv ein chemisches: Es ist ein Problem, an dessen Lösung Chemie, Soziologie, Psychologie, Gesundheitswesen und „City Management“ arbeiten müssen, aber der chemische Aspekt ist essentiell. Auf ähnliche Weise muss das Verstehen des „Frackings“ Chemie, Geologie (und Geochemie), Klimaforschung und Gesundheitswesen einbeziehen. Das Entwickeln von Hypothesen über den Ursprung des Lebens muss Chemie, Biologie und Planetenforschung einbeziehen. Weil die Chemie wohl diejenige Wissenschaft unter den Naturwissenschaften ist, die sich am intensivsten mit der wahrnehmbaren Welt beschäftigt, kann sie den größten Nutzen aus neuen Allianzen mit solchen Fächern ziehen – insbesondere aus den Sozialwissenschaften –, in denen molekulare Wechselwirkungen und menschliches Verhalten überlappen.

Prioritäten setzen für die Zukunft

Politische und finanzielle Notwendigkeiten. Viele Faktoren jenseits akademischer Präferenz bestimmen, welche Bereiche der Wissenschaften aufblühen: Intellektuelle und andere Träger halten Universitäten von schnellen Änderungen ab, Regierungen und Gesellschaften haben ihre je eigene Agenda, die mit denen von Professoren nicht zwangsläufig abgeglichen sind. Für die absehbare Zukunft werden viele der wichtigsten Probleme der Gesellschaft (und vielleicht auch der Regierungen) die Chemie benötigen, obwohl nicht unbedingt die Art von Chemie, die momentan in Forschungsuniversitäten populär ist. Die Umwelt zu stabilisieren, Energie zu „verwalten“, erschwingliche Gesundheitsvorsorge anzubieten, Arbeitsplätze zu schaffen, Gesellschaften zu schützen in ungewissen Zeiten: Dies sind außergewöhnliche Herausforderungen, Chancen und Verpflichtungen, aber sie sind auch vergänglich: Wenn die Chemie sie nicht für sich vereinnahmt, werden es andere Gebiete tun. Für große Chemieunternehmen wird der kurzfristige finanzielle Ertrag auch künftig die Strategie bestimmen. Wird es möglich sein, den akademischen Enthusiasmus für eine Forschungsförderung ohne Auflagen, den Auftrag einer Regierung, Probleme zu lösen, und den Fokus der Industrie auf Rentabilität zusammenzuführen?

Akademische Strategie: Neugier oder Probleme lösen – oder beides? Wissenschaftler – besonders jene, die von sich selbst denken, dass sie kreativ, neugiergetrieben forschen – meinen häufig, dass „reine Wissenschaft“ und Anwendungen irgendwie inkompatibel seien. Don Stokes entwickelte eine nützliche Formulierung dieses Problems, das heute als „Pasteurs Quadrant“ bezeichnet wird (Abbildung 7).^[20] Danach



Abbildung 7. Das von Don Stokes vorgeschlagene Quadranten-Diagramm zur Illustration unterschiedlicher Forschungsstile, mit einer für den vorliegenden Essay leicht abgewandelten Terminologie – „reine Forschung“ („pure research“) und „angewandte Forschung“ („applied research“) wurden durch „Wissen“ („knowledge“) bzw. „Lösungen“ („solutions“) ersetzt. Die Begründung für diese Abwandlung ist, dass die Unterscheidung zwischen „rein“ und „angewandt“ artifiziell scharf getroffen wurde; es gibt keine klare Trennlinie, die Forschung zur Schaffung von Wissen (das am Ende idealerweise zur Problemlösung verwendet wird) von der Forschung zur Lösung von Problemen (die für große, nicht routinemäßige Probleme das Schaffen von neuem Wissen und Verständnis erfordert) separiert.

wird die Wissenschaft künstlich aufgeteilt in Probleme, deren Bearbeitung durch Neugierde und Verstehenwollen motiviert ist, und solche, deren Lösung praktischen Nutzen verspricht. Der Name Bohr ist mit dem ersten dieser Stile verbunden, Edison mit dem zweiten. Der interessanteste Quadrant trägt den Namen Pasteurs, dem frühe Arbeiten an Impfstoffen – heute angewandte Immunologie – und über Hitzesterilisation – heute Mikrobiologie – zugeschrieben werden. Pasteurs Vorgehensweise beginnt mit der Identifizierung von praktischen Problemen der Gesellschaft (Tod durch Tollwut; Krankheiten durch verdorbene Milch), für die keine Lösungen und keine relevante Wissenschaft existierten, und dann findet er Lösungen und begründet neue Wissenschaftsdisziplinen. Pasteur wendete keine bekannte Wissenschaft an; er erfand neue Wissenschaft, um sie dann anzuwenden. Pasteurs Quadrant impliziert, dass es möglich ist, die Entwicklung einer fundamentalen Wissenschaft mit dem Lösen von Problemen gesellschaftlicher Bedeutung zu koppeln. Er nutzt schwierige Probleme, um wissenschaftliche Entdeckung zu stimulieren. In Pasteurs Quadrant zu arbeiten, ist nicht – wie es manchmal genannt wird – „nur Anwendungsforschen“.^[20b]

Die unproduktiven Debatten über „reine“ und „angewandte“ Forschung bilden auch eine der Ursachen für die Probleme des Peer-Review-Systems. Eine „populistische Begutachtung“ von Forschungsanträgen filtert sehr erfolgreich die Anträge mit den schlechtesten Ideen heraus, manches Mal aber auch die ehrgeizigsten und originellsten. Forschung in Pasteurs Quadrant ist, im Idealfall, zugleich durch Neugierde und das Streben nach dem Lösen von Problemen motiviert. Es ist dabei ehrgeizig und risikoreich entlang beider Achsen – und daher vermutlich auch ungeeignet, durch modernes Peer-Review beurteilt zu werden; Pasteur hätte es wahrscheinlich schwer im modernen Peer-Review-System. Forschung in Pasteurs Quadrant wird eine Modifizierung des Peer-Review-Systems erfordern.

Veränderung

„Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, dass ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, dass ihre Gegner allmählich aussterben und dass die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht ist.“

Max Planck

Wenn die Chemie Veränderung braucht, weg von dem Stil, der nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelt wurde, hin zu einem, der nötig ist, um eine ganz andere Art von Problemen zu lösen – wer sollte die Avantgarde sein?

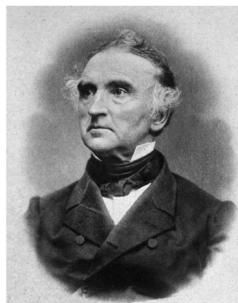
Forschungsuniversitäten: im Prinzip die Organisationen mit der größten Flexibilität. Universitäten sollten im Idealfall die führende Rolle bei der Veränderung der Struktur der Chemie einnehmen – nicht weil sie kompetenter als die Industrie oder die Regierung sind, sondern weil sie weniger eingeschränkt sind, und weil eine ihrer Aufgaben die Lehre ist, und Lehre bestimmt die Zukunft. Viele nützliche Arten von Veränderungen könnten (im Prinzip) einfach bewerk-

stelligt werden: Zusammenschluss mehrerer Departments (Chemie, Biochemie, Chemieingenieurwesen, Materialwissenschaften), Verbreiterung des Lehrplans, Änderung von Einstellungskriterien, in dem Sinne, dass gemeinschaftliche Forschung stärker gewürdigt wird. Andere Veränderungen könnten schwieriger sein. Zum Beispiel ist man sich zunehmend einig (zumindest in den USA), dass universitäre Forschungsgruppen in vielen Gebieten der Wissenschaft (einschließlich der Chemie) eine gewisse Form der Restrukturierung nötig haben.^[21] Liebig käme die Struktur heutiger Forschergruppen durchaus noch bekannt vor: ein Professor, ein Doktorand, ein Projekt, eine Doktorarbeit, eine Publikation (Abbildung 8). Diese Struktur ist im Grunde genommen

Das Liebigsche Lehrling-Modell

Der Meister vermittelt Studenten sein Können durch wiederholtes Einüben.

Er war einer der ersten Chemiker, der sein Laboratorium so wie wir es heute kennen organisierte. Sein pädagogischer Ansatz ermöglichte es ihm, viele Doktoranden gleichzeitig zu betreuen.



Justus von Liebig
1803-1873

Abbildung 8. Liebig erfand eine Organisationsform für die Durchführung akademischer Forschung mit Studenten (das „Meister-und-Lehrling-Modell“). In vielen Gebieten der chemischen Forschung hat sich dieses Modell über einen Zeitraum von 150 Jahren nicht geändert. Da die Studenten von heute in ihrem Leben Problemen gegenüberstehen werden, die noch nicht existieren, ist das Liebigsche Modell nicht mehr zeitgemäß.

men die von Meister und Lehrling – und das ist zweifelsohne genau das, was sich nicht eignet für Studierende, die in ihrer Laufbahn Problemen gegenüberstehen werden, die ihre Professoren nicht lösen konnten.

Und was ist mit der Lehre? Internet und soziale Netzwerke haben tiefgreifende Auswirkungen auf Studierende; ihr Einfluss auf die Lehre ist noch in den Anfängen. Lehrbücher werden fast sicher verschwinden. Da nun alles frei ins Netz gestellt werden kann, können Dozenten aussuchen und wählen, was sie für die Lehre brauchen, und Studenten werden weitgehend nicht dafür bezahlen müssen. MOOCs, Web-basierte Werkzeuge, aktives Lernen, „umgedrehter“ Unterricht, interaktive Unterrichtsräume – all das sind wichtige Experimente. Google Glass könnte ein Schritt sein hin zum Verschwinden der Universität als ein realer Ort mit Gebäuden und Mensa, mit Professoren und Studenten. Meine Fantasie reicht nicht aus, um vorherzusagen, wie man „echte“ Laboratorien komplett durch virtuelle ersetzen können, aber viele gemeinsam genutzte Instrumente werden jetzt schon aus der Ferne (virtuell) bedient.

Die chemische Industrie: Rückzug oder Evolution und Umbruch? Die großen Chemiekonzerne sind unverzichtbar für die Produktion von chemischen Produkten und Treibstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis, die den Umschlag großer Mengen an Material, Energie und Kapital erfordern. Sie ha-

ben sich eingelebt in eine Strategie der technisch ausgefeilten Verbesserungen an bestehenden Prozessen und Produkten. Industrien, die sich nicht verändern, wenn sich Technologien dramatisch verändern, verschwinden manchmal – z.B. Firmen, die Dampfmaschinen, Filme für die Silberhalogenid-Fotografie und Rechenmaschinen produzierten –, aber die Gesellschaft wird weiterhin Schwefelsäure, Beton und Polyethylen benötigen. Die größten Chemiekonzerne werden nicht verschwinden, aber eine Zukunft, in der Verbrauchsmaterialien mit schrumpfenden Gewinnspannen produziert werden, ist nicht aufregend. Wichtiger noch ist, dass diese riesigen, technisch ausgereiften Firmen über einzigartige Fertigkeiten verfügen, technisch anspruchsvolle und gefährliche Prozesse in sehr großem Maßstab zu bewältigen, Energie-, Wärme- und Materialflüsse zu steuern und mit Kapital umzugehen: Es wäre ein großer Verlust, wenn diese Fertigkeiten keine Anwendung fänden beim Management von Wasserressourcen, der Atmosphäre und von Megastädten (Abbildung 5). Der Gesellschaft (und ihren „Anteilseignern“) stünde es sehr viel besser, würde sie künftige Wachstumsrichtungen erkunden, statt sich in einen Ruhestand zurückzuziehen, an dem die Technologieströme einer zukünftigen Welt vorbeigehen.

Regierung. Regierungsbehörden allerorts könnten die Wirksamkeit der Gelder, die sie ausgeben, erhöhen, indem sie die mit der Vergabe dieser Gelder verbundene Bürokratie mindern. Der Arbeitsaufwand, um Forschungsanträge, Berichte und Gutachten zu schreiben – weltweit –, ist heutzutage außerordentlich, schädigt die geförderte Forschung und ist letztendlich verantwortungslos gegenüber dem Steuerzahler. Junge Forscher, die neue Forschungsfelder erschließen, lernen schnell, wo Bürokratie herrscht und wenden sich wenn möglich anderswo hin. Bürokratie behindert Innovation, und Bürokratie zieht Bürokraten an.

Nichtsdestotrotz steuern Behörden – abgesehen vom Geld – nach wie vor Fragestellungen bei und setzen Prioritäten in Gebieten, deren Bearbeitung so langfristig sein muss, dass sich die Industrie damit nicht befassen kann, oder die zu unkonventionell sind, als dass Universitäten darüber nachgedacht hätten; sie können Forschungsgebiete anstoßen, die 50 Jahre bis zur Reife brauchen, und neue und manchmal unwillkommene Ideen in die Wissenschaft und Technologie einführen. Manche Behörden sind besser darin, manche sind schlechter. Geld und ein gutes Forschungsmanagement können sehr viel wertvoller sein als Geld allein.

Chemie, verständliche Wissenschaft und Stilempfinden

Ein letzter Punkt: Die Chemie ist unermüdlich utilitaristisch in der Art, wie sie sich der Öffentlichkeit präsentiert. Der mittlerweile aufgegebene DuPont-Slogan „Better things for better living through chemistry“ ist ein Beispiel. Dieser Spruch mag Chemikern gefallen haben, aber die meisten Menschen dachten bei „better things“ an Kleber und Farbe. Nützlich ja, aber nichts Besonderes, nicht viel Poesie dabei.

Wenn die öffentliche Wertschätzung einer Wissenschaft oder eines Forschungsgebietes gering ist, gibt es wenig öff-

fentliche Unterstützung und letztendlich auch wenig Geld. Am Ende eines Jahres veröffentlicht die populärwissenschaftliche Presse gerne Rankings: „Die 100 aufregendsten Erfindungen des Jahres 20XX!“ Die Chemie wird selten erwähnt. Chemie-Nobelpreise werden in den Medien weitgehend ignoriert. Die Gesellschaft wird die Chemie nur so weit unterstützen, wie sie von dem, was sie tut, begeistert ist; und der Teil der Gesellschaft, der Wissenschaft liebt, liebt sie nicht für besseren Kleber, sondern dafür, dass sie uns zum Staunen bringt, für großartige Ideen und ihren Zauber und für die Verheißen des Außergewöhnlichen.

Anderen Gebieten gelingt es, aufregend zu sein, jedem auf seine eigene Weise. Obwohl auch die Biologie ein Gebiet mit ebenso vielen unverständlichen Details wie die Chemie ist, „heilt Biologie Krebs“, und „Leben“ ist sicher geheimnisvoll und unendlich wundervoll. Die Physik sinnt nach über die Geheimnisse von Raum und Zeit. Die Astronomie bringt uns wunderbare Bilder von explodierenden Sternen und flüstert vom Urknall und von schwarzen Löchern. Informatik und Social Engineering verdrahten die Köpfe unserer Kinder neu. Sogar die Statistik hält nun Wache über „Big Data“ (was auch immer das sein mag). Was macht die Chemie? „Besseren Kleber“ ist keine fesselnde Antwort.

Lassen Sie mich eine Unterhaltung skizzieren, die ich bei verschiedensten Anlässen auf die eine oder andere Weise geführt habe, bei Tischgesellschaften und in Flugzeugen. Die Person neben mir fragt: „Was tun Sie beruflich?“ Ich antworte: „Ich bin Chemiker.“ Sie/er antwortet: „Chemie war das einzige Fach in der Schule, in dem ich durchgefallen bin. Was macht man denn eigentlich so als Chemiker?“ Ich habe zwei Arten von Antwort probiert.

Die eine ist: „Nun, wir machen Wirkstoffe, z.B. die Statine. Sehr nützlich. Das sind Hemmer für ein Protein namens HMGA-CoA-Reduktase, und sie helfen, die Cholesterinbiosynthese zu kontrollieren und kardiovaskuläre Krankheiten einzudämmen.“ Diese Antwort beendet die Unterhaltung üblicherweise.

Die zweite ist: „Wir verändern die Art, wie Sie leben und sterben.“

Die zweite funktioniert besser.

Danksagung

Ich danke meinem langjährigen Freund und Kollegen Professor John Deutch (MIT) für seine oft exzellenten und manchmal alarmierenden Anmerkungen zum Thema dieses Essays. Ich danke außerdem meiner Frau Barbara und den Mitarbeitern meiner Forschungsgruppe, die halfen, diesen Text klarer werden zu lassen.

Eingegangen am 19. November 2014
Online veröffentlicht am 12. Februar 2015

Übersetzt von Philipp Rothmund und Christoph Keplinger, Cambridge

[1] F. Aftalion, *A History of the International Chemical Industry*, 2. Aufl., Chemical Heritage Press, Philadelphia, 2001.

- [2] „Fundamental research means basic and applied research in science and engineering, the results of which ordinarily are published and shared broadly within the scientific community, as distinguished from proprietary research and from industrial development, design, production, and product utilization, the results of which ordinarily are restricted for proprietary or national security reason.“ (National Security Decision Directive (NSDD) 189, National Policy on the Transfer of Scientific, Technical, and Engineering Information), **1985**.
- [3] a) M. J. Nye, *Before Big Science: The Pursuit of Modern Chemistry and Physics, 1800–1940*, Twayne, Prentice Hall, New York, London, **1996**; b) C. M. Vest, *The American Research University from World War II to World Wide Web: Governments, the Private Sector, and the Emerging Meta-University*, University of California Press, Berkeley, **2007**.
- [4] N. Davies, *Europe at War, 1939–1945: No Simple Victory*, Macmillan, London, **2006**.
- [5] a) V. Bush, *Science the Endless Frontier. A Report to the President*, United States Government Printing Office, Washington, DC, **1945**, Siehe: <https://www.nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm>; b) G. P. Zachary, *Endless Frontier: Vannevar Bush, Engineer of the American Century*, MIT Press, Cambridge, **1999**.
- [6] L. Stout, *The Shareholder Value Myth*, Berrett-Koehler, San Francisco, **2012**.
- [7] a) C. M. Christensen, *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*, Harvard Business School Press, Boston, **1997**; b) J. Lepore, *The Disruption Machine: What the gospel of innovation gets wrong*, The New Yorker, June 23, 2014, 1–14; c) J. S. Francisco (Chair), Innovation, Chemistry, and Jobs, Meeting the Challenges of Tomorrow, American Chemical Society, Washington, DC, **2011**.
- [8] a) G. Whitesides, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1990**, *29*, 1209–1218; *Angew. Chem.* **1990**, *102*, 1247–1257; b) G. M. Whitesides, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 3632–3641; *Angew. Chem.* **2004**, *116*, 3716–3727.
- [9] a) F. J. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, **1985**; b) C. De Duve, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson Publishers, Carolina Biological Supply Company, Burlington, **1991**; c) E. Schrödinger, *What is Life? And Other Scientific Essays*, Cambridge University Press, Cambridge, **1944**.
- [10] a) U. Weiss, *Quantum Dissipative Systems*, 4. Aufl., World Scientific, New Jersey, **2012**; b) J. K. Hale, *Asymptotic Behavior of Dissipative Systems*, American Mathematical Society, Providence, **1988**; c) J. C. Willems, *Arch. Ration. Mech. Anal.* **1972**, *45*, 321–351; d) J. C. Willems, *Arch. Ration. Mech. Anal.* **1972**, *45*, 352–393.
- [11] a) P. W. Snyder, M. R. Lockett, D. T. Moustakas, G. M. Whitesides, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **2014**, *223*, 853–891; b) P. Ball, *H₂O: A Biography of Water*, Weidenfeld & Nicolson, London, **1999**.
- [12] T. S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Suhrkamp Verlag, Berlin, **2001**.
- [13] R. P. Feynman, *Feynman Lectures on Computation*, Westview Press, **1996**.
- [14] S. H. Woolf, L. Aron, *US Health in International Perspective: Shorter Lives, Poorer Health*, National Academies Press, **2013**.
- [15] a) P. J. Turnbaugh, M. Hamady, T. Yatsunenko, B. L. Cantarel, A. Duncan, R. E. Ley, M. L. Sogin, W. J. Jones, B. A. Roe, J. P. Affourtit, *Nature* **2009**, *457*, 480–484; b) I. Cho, M. J. Blaser, *Nat. Rev. Genet.* **2012**, *13*, 260–270.
- [16] a) D. MacKay, *Sustainable Energy - Without the Hot Air*, UIT, Cambridge, **2008**; b) Das Original von Abbildung 6 stammt von der Homepage des Lawrence Livermore National Laboratory: <https://flowcharts.llnl.gov/>.
- [17] a) F. J. Dyson, *The Sun, the Genome & the Internet: Tools of Scientific Revolutions*, Oxford University Press, New York, **1999**; b) P. Galison, *Image and Logic: A Material Culture of Micro-physics*, University of Chicago Press, Chicago, **1997**; c) F. Dyson, *Science* **2012**, *338*, 1426–1427.
- [18] a) G. M. Whitesides, The Frugal Way, *The Economist*, November **2011**, 154; b) C. K. Prahalad, *The Fortune at the Bottom of the Pyramid*, Pearson Education India, **2006**; c) M. Yunus, *Creating a World Without Poverty: Social Business and the Future of Capitalism*, Public Affairs, **2007**.
- [19] a) P. R. Ehrlich, J. P. Holdren, *Science* **1971**, *171*, 1212–1217; b) S. D. Lane, *Soc. Sci. Med.* **1994**, *39*, 1303–1314.
- [20] a) D. E. Stokes, *Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation*, Brookings Institution Press, **1997**. b) Den leeren, namenlose Quadranten in Abbildung 7 nennt man bisweilen, wohl etwas unfreundlich, den „Universitätsquadranten“.
- [21] a) S. Tilghman (Chair), Biomedical Research Workforce Working Group Report: a Working Group of the Advisory Committee to the Director, National Institutes of Health, Washington, DC, **2012**; b) L. Faulkner (Chair), *Advancing Graduate Education in the United States*, American Chemical Society, Washington, DC, **2012**.