

Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft 2
XLAB Science Festival

Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft 2

XLAB Science Festival

*Herausgegeben von
Eva-Maria Neher*



WALLSTEIN VERLAG

Das Science Festival 2005 wurde gefördert
von der Max-Planck-Gesellschaft und dem Universitätsbund Göttingen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Wallstein Verlag, Göttingen 2006
www.wallstein-verlag.de

Satz: Da-TeX Gerd Blumenstein (www.da-tex.de)
gesetzt aus der Stempel Garamond

Umschlaggestaltung: Basta Werbeagentur, Steffi Riemann

Druck: Hubert & Co, Göttingen

ISBN-13: 978-3-8353-0055-2

ISBN-10: 3-8353-0055-5

Inhaltsverzeichnis

MANFRED EIGEN	
Geleitwort	7
EVA-MARIA NEHER	
Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft – und die Besten sollen Lehrer sein	9
WOLF SINGER	
Wann und Warum erscheinen uns Entscheidungen als Frei? . .	15
PETER FROMHERZ	
Semiconductors with Brain	43
ANTON ZEILINGER	
Verschränkung – ein Quantenrätsel für jedermann	73
MARK WALKER	
Naturwissenschaftler und Nationalsozialismus	91
WALTER JAKOB GEHRING	
New Perspectives on Eye Development and the Evolution of Eyes and Photoreceptors	137
PAUL J. CRUTZEN	
Mein Leben mit O ₃ , NO _x und anderen YZO _x -Verbindungen (Nobel-Vortrag)	163
KONRAD SAMWER UND SUSANNE SCHNEIDER	
Glas – ein alter Werkstoff aber aktuelle Physik	219
Die Autoren	229

Manfred Eigen

Geleitwort

Das Göttinger XLAB ist eine von Eva-Maria Neher gegründete, aus Stiftungsgeldern finanzierte und bundesweit beachtete Einrichtung, in der Schüler unter Anleitung von Wissenschaftlern der Universität Göttingen selbständig physikalische, chemische und biologische Experimente ausführen können. Alljährlich vor den Weihnachtsferien lädt Eva-Maria Neher renommierte Wissenschaftler aus dem In- und Ausland zu einer Vortragsveranstaltung ein, die sie stolz als »XLAB Festival« bezeichnet. Die in diesem Buch veröffentlichten Vorträge zeigen, daß es sich bei dieser Tagung – wie schon im Vorjahr – in der Tat um ein wahres Fest handelt, das auch vom Auditorium – in der Mehrzahl Schüler mit ihren Lehrern, darüber hinaus Studenten, Professoren und eine wissenschaftlich interessierte Öffentlichkeit – mit großem Beifall aufgenommen wurde. Wo bekommt man schon in dieser Konzentration aktuelle Wissenschaft so transparent geboten?

Da geht es zunächst um unser vornehmstes Organ, das Gehirn, das einer der großen Experten der neurobiologischen Forschung als ein »Orchester ohne Dirigent« vorstellt. In einem anschließenden Vortrag wird gezeigt, wie man einzelne Zellen dieses Organs und ihre Verknüpfung zu einfachen Netzwerken auf ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften und die daraus abzuleitenden biologischen Konsequenzen experimentell direkt untersuchen kann.

Gleich darauf ein Höhepunkt molekularbiologischer Forschung der letzten Jahre: die Evolution des Auges. Daß das Auge Teil unseres Gehirns ist, wußten wir schon des längeren. Aber daß seine Urformen Vorläufer des Gehirns waren, ist eine faszinierend neue Erkenntnis.

Nicht minder aufregend sind moderne experimentelle Einblicke in abstrakteste physikalische Probleme. Hinter dem Titel: »Einstein's Schleier und Einstein's Spuk« verbirgt sich neues Naturverständnis, eine Annäherung unserer durch Vorurteile geprägten Ansichten an die

experimentell längst erwiesene Realität quantenmechanischer Gesetze. In einem Experimentalvortrag über den altbekannten Werkstoff Glas kommt man aus dem Staunen nicht heraus. Der Bezug zur Moderne wird vor allem in den interessanten magnetischen Eigenschaften der »Spingläser« offenbar.

Aber was wäre ein solches Fest der Wissenschaften ohne kritische Hinterfragung der Folgen neuer Erkenntnis und des darauf gründenden technischen Fortschritts. Aus berufenem Munde wurde das Auditorium anhand sorgfältig ermittelter Meßdaten – der Vortragende wurde dafür mit dem Nobelpreis in Chemie ausgezeichnet – über die möglichen Gefahren menschlicher Aktivitäten für die Umwelt informiert. Das Fazit lautet: nicht weniger Forschungen, sondern mehr und damit bessere, umweltfreundliche Chemie, auf die unser dichtbevölkerter Planet nun einmal angewiesen ist.

Die beiden Festtage wurden verbunden durch einen Abendvortrag, der Entgleisungen naturwissenschaftlicher Forschung unter dem Diktat des Nationalsozialismus an den Pranger stellt.

Ich wünsche diesem Buch, in dem über all diese Themen ausführlicher berichtet wird, die ihm gebührende Verbreitung.

Juli 2006

Aus den Elfenbeintürmen der Wissenschaft – und die Besten sollen Lehrer sein

Mit den Vorträgen hervorragender Wissenschaftler geleitete das 2. Science Festival erneut Schüler, Lehrer, Studenten, wissenschaftliche Kollegen, kurz: alle Interessierten, in die Spitzen der Elfenbeintürme und ließ sie teilhaben an den Ergebnissen jahrzehntelanger Forschungsarbeit oder an noch visionären Zielen für die Zukunft.

Das Wort Festival weckt die Vorstellung, dass es sich um ein spektakuläres Event handelt. Wahrhaftig ist das XLAB Science Festival spektakulär, doch eher im Sinne einer Gala-Veranstaltung, die im amerikanischen Sprachgebrauch als »spectacular« bezeichnet wird.

Sollten wir unser Science Festival also in Zukunft besser »Wissenschaftsgala« nennen, um falschen Erwartungen vorzubeugen? Doch, vielleicht fühlt sich dann unsere eigentliche Zielgruppe nicht mehr angesprochen, weil ein Parkett vermutet wird, auf dem nur noch wenige zugelassen sind.

Bleiben wir also bei der englischen Überschrift »Science Festival« und bemühen uns, unseren Gästen verständlich zu machen, dass es sich nicht um eine naturwissenschaftliche Unterhaltung handelt, die man Schülern so kurz vor Weihnachten während der Unterrichtszeit gönnen darf. Schicken wir uns also an, unsere Zuhörer zukünftig auf dieses anspruchsvolle Ereignis besser vorzubereiten und deutlich zu machen, dass das XLAB-Science Festival für alle Zuhörer eine lohnende und zukunftsweisende Erweiterung des naturwissenschaftlichen Wissens ist.

Die Inhalte der Vorträge sind nicht leicht verständlich. Abgesehen von den Fachkollegen wird man von keinem der Zuhörer erwarten können, dass die wissenschaftlichen Inhalte bekannt sind. Der Schüler wird häufig erstmalig wahrnehmen, dass der Schulstoff nur ein kleiner und fast schon historischer Teil des verfügbaren Wissens ist. Der

junge Zuhörer wird herausragende Wissenschaftler erleben, die eine große Begeisterung für ihr Forschungsgebiet ausstrahlen und für ihre bahnbrechenden Erkenntnisse vielfach ausgezeichnet wurden. An diesen Ergebnissen ihrer Forschung wollen die Vortragenden unser noch nicht wissenschaftlich geprägtes, junges Publikum teilhaben lassen, indem sie versuchen, den großen Graben zwischen dem Schulwissen und dem Stand der Forschung zu überbrücken.

So ist es überaus spannend, die revolutionären Schlussfolgerungen aus der modernen Hirnforschung zu hören. Welch weit reichende gesellschaftliche Konsequenzen kann die Erkenntnis nach sich ziehen, dass unser Gehirn arbeitet und gleichzeitig z.B. aufgenommene Sinnesindrücke verarbeitet, ohne dass wir ein Bewusstsein davon haben. Unser Gehirn erinnert sich in einem für uns unerwarteten Augenblick an Namen, Zusammenhänge und Details, die wir zuvor nicht aktiv in das Gedächtnis zurückrufen konnten – eine Erfahrung, die jeder schon gemacht hat. Wenn unser Gehirn also diese Eigenständigkeit besitzt, wie steht es dann mit der grundsätzlichen Verantwortlichkeit des Menschen für sein Handeln im Allgemeinen? Der Aufsatz von Wolf Singer thematisiert diese Grundsatzfrage.

In den Bereich Science Fiktion fielen bislang die Geschichten von direkten Interaktionen zwischen Mensch und Computer. Natürlich kann damit allein die Steuerung von Maschinen durch ein denkendes Gehirn gemeint sein, doch wie ist es umgekehrt? Was der Laie in Filmen stauend wahrnimmt und gerne bereit ist, in der Welt der Fantasie zu belassen, kann für einen Forscher eine unwiderstehliche Herausforderung sein. Der Physiker Peter Fromherz hat die prinzipiellen Ähnlichkeiten und Unterschiede der Funktionsweise von Gehirn und Computer aufgezeigt. Nervenzelle und Computerchip arbeiten beide elektrisch, doch sprechen sie verschiedene Sprachen. Die Nervenzelle benutzt als Ladungsträger Ionen und der Computerchip Elektronen. Wie beide Systeme miteinander kommunizieren, beschreibt Peter Fromherz in seinem Aufsatz »Semiconductors with Brain«.

Anton Zeilinger, Experimentalphysiker in Wien, führt Laien in die phantastische Welt der Quantenphysik. Anhand von lebenspraktischen Beispielen wie der Größe, der Augen- und Haarfarbe von Zwillingssäuglingen, wird in dem Kapitel »Verschränkung – ein Quantenrätsel für jedermann« das Wesen der Bell'schen Ungleichung verständlich gemacht. Die Bedeutung der Verschränkung von zwei Quantenteilchen, das heißt die Antwort des zweiten Teilchens auf Änderung am Zwi-

lingsteilchen legt Anton Zeilinger spannend dar. Das Zauberwort heißt Teleportation. Schon Einstein war diese »spukhafte Fernwirkung« von Quantenteilchen bekannt. Der vorliegende Aufsatz aus dem Buch »Einsteins Spuk« ist nur eine Kostprobe und ersetzt keineswegs die Lektüre des Gesamtwerkes und schon gar nicht das unvergessliche Erlebnis des Vortrages von Anton Zeilinger am 20. Dezember 2005.

Das Science Festival will mit dem abendlichen Festvortrag die Geisteswissenschaften einbeziehen, um einen bescheidenen Versuch zu machen, Gemeinsamkeiten zwischen den heute einander recht fremd gewordenen Wissenschaften herauszustellen. 2005 haben wir den Historiker Mark Walker aus den USA eingeladen, um über seine Recherchen zum Thema »Naturwissenschaft und Nationalsozialismus« zu sprechen. Mark Walker hat auf die Interpretation von Dokumenten praktisch vollständig verzichtet und lässt die Originalzitate aus Briefen von Albert Einstein, Max von der Laue, Ludwig Prandtl, Werner Heisenberg, Carl Friedrich von Weizsäcker und auch Heinrich Himmler für sich sprechen. Mark Walker überlässt es dem Leser, die facettenreichen Textstellen zu interpretieren.

Die Entwicklungsbiologie bedient sich einiger weniger Modellorganismen: Fruchtfliege, Zebrafisch und Maus. Das erstaunliche Ergebnis dieser Forschung ist, dass alle Organismen und letztendlich auch der Mensch in ihrer embryonalen Entwicklung ähnlichen Regulationsmechanismen, die in ihren Genen verankert sind, folgen. Am Beispiel der Entwicklung und der Evolution der Augen bei der Fliege hat Walter Gehring dieses fantastische Zusammenspiel der Gene erklärt.

Das Ozonloch über der Antarktis wurde Ende der 1970er Jahre entdeckt. Parallel dazu beobachtete man einen kontinuierlichen Anstieg des stratosphärischen Chlors. Bald war klar, dass die als Treibgas und Gefriermittel eingesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) die Ursache für den Ozonabbau waren. Seit 1992 wird der Abbau der Ozonschicht auch über der Nordpolarregion beobachtet, der jedoch aus klimatischen und geographischen Gründen weitaus geringer ist als über dem Südpol. In dem Protokoll von Montreal am 16. September 1987 wurden die so genannten Treibhausgase verboten. Seither ist eine Verbesserung der Situation deutlich messbar, doch mit dem Schließen des Ozonlochs rechnen Experten nicht mehr vor 2065.

Paul J. Crutzen wurde 1995 für seinen Beitrag zur Erforschung des Ozonabbaus mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Die deutsche Übersetzung seines Nobelvortrages ist in diesem Band abgedruckt.

Ironisch tröstet Prof. Crutzen, »... dass es ein Glück war, dass die chemische Industrie nicht Bromverbindungen anstatt der FCKWs eingesetzt hat oder wenn die Chlorchemie der Bromchemie ähnlicher wäre. Denn dann wären wir bereits in den siebziger Jahren völlig unvorbereitet einem katastrophalen Ozonloch überall und zu jeder Jahreszeit ausgesetzt gewesen. (...) ich kann nur schließen, dass wir viel Glück gehabt haben. Dies zeigt auch, dass wir allzeit auf der Hut sein sollten bezüglich möglicher Folgen des Eintrags neuer Produkte in die Umwelt«. Was vielleicht manchem Zuhörer während des Vortrages angesichts der Fülle an Daten schwer verständlich war, erschließt sich bei der Lektüre des Nobelvortrages und bringt uns in eindrucksvoller Weise auch die Persönlichkeit des Wissenschaftlers Paul Crutzen nahe.

Den Abschluss des Science Festivals bildete wie immer ein Experimentalvortrag. Nach der sensationsreichen Chemievorlesung im Jahr 2004 folgte 2005 die Physik mit dem beeindruckenden Einblick in die Welt des Glases. Konrad Samwer demonstrierte, dass Glas weit mehr ist als das, was uns täglich begegnet. Überrascht erfuhren wir, dass Glas eine Molekülstruktur hat, die den Zustand einer gefrorenen Flüssigkeit beschreibt und nicht mit dem regelmäßigen Kristallgitter eines Festkörpers vergleichbar ist. Nach vielen von Susanne Schneider sorgsam vorbereiteten Experimenten staunten die Zuschauer wohl am meisten über die elastischen Eigenschaften eines Golfschlägers aus metallischem Glas.

Angesichts der großen Tragweite der naturwissenschaftlichen Forschung und der Wahrnehmung, welch anspruchsvolle Fragen derzeit bearbeitet werden, mag sich der junge Zuhörer resigniert fragen, ob er jemals solch gute Ideen haben wird. Die erfrischende Offenheit, mit der chinesische Studenten mutig die Frage »wie werde ich Nobelpreisträger?« an einen Laureaten richten, passt nicht zum Wesen eines deutschen Studenten oder Schülers. Da es ein Rezept für den wissenschaftlichen Erfolg nicht gibt, folgt nach kurzer Sprachlosigkeit die einfache Antwort des Laureaten: »Ich rate jedem, viele interessierte Fragen zu stellen, viel zu lesen und sich fleißig ein gutes Handwerkszeug in den Grundlagen aller Naturwissenschaften anzueignen.«

Die ersten Grundlagen für ein gutes Handwerkszeug sollte die Schule legen. Doch ist damit nicht gemeint, primär auf einen guten Notendurchschnitt im Abitur hinzuarbeiten. Geschicktes Notenmanagement bedeutet im augenblicklichen Schulsystem immer noch, manche naturwissenschaftlichen Fächer abzuwählen. Wer sich dazu angesichts eines

speziellen Studienwunsches in einem Fach, das dem Numerus clausus unterliegt, gezwungen sieht oder aber mangels Angebot gar nicht die Chance hat, Physik, Chemie oder Biologie in der Oberstufe des Gymnasiums zu belegen, ist gut beraten, viele Versäumnisse nachzuholen. Ein »Einserabitur« erleichtert den Zugang zu zulassungsbeschränkten Fächern, doch garantiert es nicht den Erfolg beim Studienbeginn.

Ist es Schülern, die in der Mittelstufe von diesen Unterrichtsfächern so sehr begeistert waren, überhaupt zu raten, ein solches Fach zu studieren? Sicher, denn Begeisterung ist die Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Studium. Jedoch erfordert die Konfrontation mit den auf Quantifizierbarkeit ausgerichteten chemischen und physikalischen Lehrinhalten schon in den ersten Semestern große Anstrengungen. In der Unvereinbarkeit von schulischen Voraussetzungen mit den Anforderungen an den Hochschulen liegt ein Grund für die hohe Studienabbrucherquote. In Deutschland verlassen etwa 23 % der Studienanfänger in den Naturwissenschaften und Mathematik nach durchschnittlich sieben Hochschulseimestern die Universitäten ohne Examen. Viele nennen als Grund Probleme mit den Studienanforderungen.

Hierin liegt unübersehbar die Aufforderung etwas zu ändern.

Vielversprechende Reformansätze im Kurswahlssystem der Oberstufe gibt es derzeit in Niedersachsen. Wenigstens im naturwissenschaftlichen Schwerpunkt müssen ab dem Schuljahr 2006/07 zwei Naturwissenschaften gleichzeitig gewählt werden. Wie die Praxis an den Schulen aussehen wird, ob es genügend qualifizierte Chemie- und Physiklehrer geben wird, wird sich zeigen. Biologielehrer werden in der Oberstufe diesen Unterricht kaum übernehmen können. Die wenigsten haben die Fakultas für eine weitere Naturwissenschaft, da es in den vergangenen Jahrzehnten sehr verbreitet war, das Unterrichtsfach Biologie mit einem nicht-naturwissenschaftlichen Unterrichtsfach zu kombinieren. Die Reform der Oberstufe sollte demnach auch unmittelbar und konsequent in der Lehrerbildung umgesetzt werden.

Der Blick in die Praxis anderer Bundesländer zeigt vereinzelt den Trend, die Naturwissenschaften nicht auf-, sondern eher abzuwerten und nicht mehr, sondern weniger naturwissenschaftlichen Unterricht in der Oberstufe vorzusehen. Es ist hier nicht der Ort für eine Analyse von Lehrplänen für die Gymnasien und für die Lehramtsstudiengänge in den 16 Bundesländern. Es sei aber an dieser Stelle der Blick über die Staatsgrenzen erlaubt. So ist es in vielen europäischen Staaten üblich, die Lehrerbildung sehr fachspezifisch durchzuführen. Das heißt,

es werden die Studierenden zunächst nicht in Hinblick auf das angestrebte Berufsziel getrennt. Diejenigen, die das Lehramt anstreben, absolvieren nach dem Fachstudium eine Zusatzausbildung, die auf das Lehramt an Gymnasien vorbereitet, und unterrichten allein in »ihrem« wissenschaftlichen Fach.

Lehrer, die ihr Fach sicher beherrschen und über weit mehr Fachwissen verfügen, als dies der Lehrplan vorsieht, werden ihre Schüler und Schülerinnen begeistern können, weil sie selbst begeistert sind. Jedoch, nicht jeder begeisterte Fachwissenschaftler ist im Schuldienst auch ein guter Lehrer. Nur wer die Kunst des Lehrens beherrscht, kann aus der Fülle seines sicheren Wissens einen guten Unterricht gestalten. Es sollte gelingen, für die letzten beiden Schuljahre besonders qualifizierte Lehrer einzusetzen, die über große fachtheoretische Kenntnisse verfügen, Erfahrung im wissenschaftlichen Arbeiten haben und in ihrer Entscheidung, unterrichten zu wollen, eine Berufung sehen. Sie sollten unsere Schüler herausfordern und gut auf die Hochschule vorbereiten können. Natürlich hat die Schule nicht die Aufgabe, auf spezielle Studiengänge vorzubereiten, sondern sollte die Schüler primär befähigen, das Lernen zu lernen. Es sei aber die Frage erlaubt, mit welchen Mitteln dieses Ziel erreicht werden kann. Fragen wir erfolgreiche Wissenschaftler, wie sie zu der Entscheidung kamen, dieses oder jenes Fach zu studieren, so nennen sie fast ausnahmslos, voller Stolz und Dankbarkeit, ihren Lehrer.

Wolf Singer

Wann und Warum erscheinen uns Entscheidungen als Frei?

Der Konflikt zwischen Intuition und neurobiologischer Evidenz

Es mutet eigentümlich an, daß unsere Intuition Annahmen über die Organisation unseres Gehirnes macht – also jenes Organs, das diese Intuition hervorbringt – die mit den Erkenntnissen, welche die Naturwissenschaften zu Tage fördern, nicht übereinstimmen. Uns ist, als ob es in unserem Gehirn ein Zentrum gäbe, in dem alle Informationen über die Geschehen in unserem Körper und die Bedingungen der Umwelt zusammengefaßt werden. Wir vermuten, daß dies der Ort sein müßte, an dem die Sinnessignale zu Wahrnehmungen werden, an dem Entscheidungen fallen und Vorsätze gefaßt werden, an dem Handlungsentwürfe entstehen, und schließlich wäre dies der Ort, an dem das Ich sich seiner selbst bewußt wird. Die moderne Hirnforschung entwirft ein gänzlich anderes Bild. Wir glauben zu wissen, daß das Gehirn in extremer Weise distributiv organisiert ist und daß sich in ihm eine Fülle unbewußter und bewußter Verarbeitungsprozesse parallel vollziehen. Wir müssen davon ausgehen, daß es kein singuläres Zentrum gibt, von dem aus die vielen, an unterschiedlichen Orten gleichzeitig erfolgenden Verarbeitungsschritte koordiniert und deren Ergebnisse zusammengefaßt werden könnten.

Dies wirft die interessante Frage auf, warum ein erkennendes Organ zu so unterschiedlichen Schlußfolgerungen kommen kann, je nachdem, ob es sich bei seiner Erforschung auf die Selbsterfahrung oder auf die Fremdbeschreibung durch naturwissenschaftliche Vorgehensweise verläßt. Dieser Frage ist der zweite Teil dieser Abhandlung gewidmet. Es ergeben sich daraus zudem eine Fülle äußerst anspruchsvoller wissenschaftlicher Fragestellungen, da es die Organisationsprinzipien

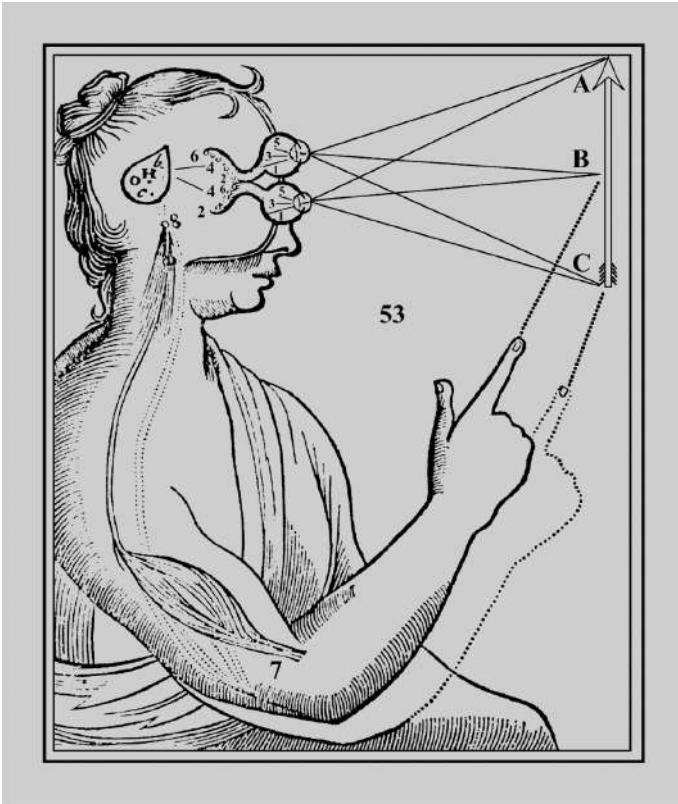


Abbildung 1: Auf der Suche nach dem Sitz der Seele boten sich dem Philosophen René Descartes zwei Strukturen im Gehirn, die nicht paarweise vorkommen: Hypophyse und die Epiphyse. Descartes entschied sich für Letztere. Heute wissen wir, dass die Epiphyse mit der Koordination der circadianen Rhythmik befasst ist.

zu erforschen gilt, die es möglich machen, daß ein System, das aus 10^{11} Einzelementen, den Neuronen, besteht, sich so zu organisieren vermag, daß es trotz seiner dezentralen Struktur in der Lage ist, kohärente Interpretationen seiner Umwelt zu liefern, angepaßte Handlungsentwürfe zu erstellen und komplexe motorische Reaktionen zu programmieren. Sich mit diesen praktischen Fragen zu befassen, gehört zum Alltagsgeschäft der Hirnforschung. Hierbei wird das Gehirn als ein Organ wie jedes andere betrachtet und die Grundannahme ist, daß sich seine Funktionen in naturwissenschaftlichen Beschreibungs-

systemen darstellen lassen müssen. Diese Überzeugung basiert auf ganz unterschiedlichen, jedoch konvergierenden Argumentationslinien. Zum einen scheint gesichert, daß sich Gehirne, ebenso wie der sie beherbergende Organismus, einem kontinuierlichen evolutionären Prozeß verdanken, der zu immer komplexeren Strukturen führte. Ähnlich kontinuierlich vollzieht sich die Individualentwicklung von der Befruchtung bis hin zur Ausdifferenzierung des reifen Organismus, wobei die Differenzierungsprozesse vollständig im Rahmen naturwissenschaftlicher Beschreibungssysteme erfaßt werden können. Bemerkenswert ist dabei, daß sich sehr enge Korrelationen herstellen lassen zwischen der Ausreifung bestimmter Hirnfunktionen und dem sukzessiven Auftreten immer höherer kognitiver Leistungen. Diese Evidenzen legen die Schlußfolgerung nahe, daß alle Verhaltensleistungen, also auch die höchsten kognitiven Funktionen, mit ihren psychischen und mentalen Konnotationen, auf den neuronalen Prozessen im Gehirn beruhen müssen. Bislang sind alle Befunde, die diese Schlußfolgerung nahelegen, widerspruchsfrei geblieben. Noch ist es jedes Mal gelungen, für eine definierte kognitive Funktion das entsprechende neuronale Korrelat zu identifizieren. Auch wenn die zugrundeliegenden Mechanismen noch längst nicht vollständig aufgeklärt sind, gibt es keinen Grund zur Annahme, mentale Vorgänge könnten auf anderen als neuronalen Prozessen beruhen. Dies aber impliziert, daß mentale Prozesse wie das Bewerten von Situationen, das Treffen von Entscheidungen und das Planen des je nächsten Handlungsschrittes auf Prozessen beruhen, die ihrer Natur nach deterministisch sind. Auch wenn es sich bei Gehirnzuständen, die den verschiedenen kognitiven Akten zugrundeliegen, um dynamische Zustände eines hoch nicht-linearen Systems handeln sollte – was wahrscheinlich ist – gälte nach wie vor, daß der jeweils nächste Zustand die notwendige Folge des jeweils unmittelbar Vorausgegangenen ist. Sollte sich das Gesamtsystem in einem Zustand befinden, für den es mehrere Folgezustände gibt, die eine gleich hohe Übergangswahrscheinlichkeit aufweisen, so können minimale Schwankungen der Systemdynamik den einen oder anderen favorisieren. Es kann dann wegen der unübersehbaren Zahl der determinierenden Variablen nicht vorausgesagt werden, für welche Entwicklungstrajektorie sich das System »entscheiden« wird. Das System ist aufgrund seiner Komplexität und nichtlinearen Dynamik hinsichtlich seiner zukünftigen Entwicklung offen. Es kann völlig neue, bislang noch nie aufgesuchte Orte in einem hoch dimensionalsten Zustandsraum besetzen, – was dann als kreativer

Akt in Erscheinung tritt. All dies ändert aber nichts daran, daß jeder der kleinen Schritte, die aneinander gefügt die Entwicklungstrajektorien ausmachen, auf neuronalen Wechselwirkungen beruht, die deterministischen Naturgesetzen folgen.

Diese Sicht steht im Widerspruch zu unserer Intuition, zu jedem Zeitpunkt frei darüber befinden zu können, was wir als je nächstes tun oder lassen sollen. Da gemeinhin angenommen wird, daß die Zuschreibung von Schuld, und damit einer der Grundpfeiler unserer Rechtssysteme mit der Existenz dieser Freiheit verbunden seien, werden die Grundthesen der modernen Hirnforschung mit großer Besorgnis rezipiert.

Wann betrachten wir Entscheidungen als frei?

Mein Anliegen ist es, einen kleinen Beitrag zu leisten, diese Sorgen zu zerstreuen. Vielleicht nutzt es, sich zunächst zu fragen, was wir meinen, wenn wir sagen, wir hätten frei entschieden. Dabei bedarf der Klärung, wovon wir uns frei wähnen. Vielleicht meinen wir nur, daß wir uns frei entschieden hätten, wenn wir frei von äußeren und inneren Zwängen entschieden haben, wobei nicht weiter hinterfragt werden muß, welchem Mechanismus sich der Entscheidungsprozeß selbst verdankt. Wir sagen gemeinhin, eine Person hätte sich frei entschieden, wenn kein Hinweis auf das Vorliegen besonderer äußerer oder innerer Zwänge besteht, wenn der Ausgang der Entscheidung nicht durch Bedrohung oder soziale Abhängigkeiten, durch neurotische Zwänge oder pathologische Triebstrukturen beeinflusst wurde. Wir gehen also offenbar davon aus, daß Entscheidungen dann frei sind, wenn sie über die bewußte Deliberation von Argumenten herbeigeführt werden und ohne den Einfluß von Faktoren erfolgen konnten, die diesen bewußten Akt von vorn herein in seinem normalen Ablauf hätten behindern können. Aus eben diesem Grund gelten nicht nur äußere und innere Zwänge, sondern auch Zustände eingeschränkten Bewußtseins als mildernde Umstände.

In der alltäglichen Praxis stellen wir demnach eine enge Verbindung her zwischen frei sein und bewußt sein. Wir attribuieren das Prädikat »frei« jenen Entscheidungsprozessen, die bewußt erfolgen und sich somit auf jene Variablen stützen, die bewußtseinsfähig sind. Dies können jedoch nur die Variablen sein, die im Kurzzeitspeicher des

Gehirns und/oder im sogenannten deklarativen Gedächtnis abgelegt wurden. Beides ist nur für Inhalte möglich, die mit Aufmerksamkeit belegt wurden. Nur die Variablen, die während ihrer Erfassung mit Aufmerksamkeit belegt und ins Bewußtsein gehoben wurden, gelangen in das deklarative Gedächtnis und können später wieder ins Bewußtsein gehoben werden. Ausgeschlossen bleiben dabei all die Variablen, welche Entscheidungen mit beeinflussen, doch im Augenblick der Entscheidungsfindung nicht den Weg ins Bewußtsein gefunden haben. Dies gilt für all die Lebenserfahrungen, die vor dem 3. bis 4. Lebensjahr gewonnen wurden, da diese wegen des noch nicht ausgebildeten deklarativen Gedächtnisses nicht bewußt erinnert werden können. Dazu zählen ferner die vielen grundsätzlich nicht bewußtseinsfähigen Variablen, die innere, unbewußte Bedürfnisse in den Entscheidungsprozeß miteinbringen. Dann sind es all die im Prinzip bewußtseinsfähigen Variablen, die jedoch im Augenblick der Entscheidungssuche nicht ins Bewußtsein gelangten, weil sie nicht mit der dafür notwendigen Aufmerksamkeit belegt wurden. Denn was von den im Prinzip bewußtseinsfähigen Variablen tatsächlich ins Bewußtsein gelangt, hängt wiederum ab von einer Fülle unbewußter Motive, von Verdrängungsmechanismen, von der Art der assoziativen Einbettung der abgespeicherten Inhalte, und schließlich vom Ablauf des gerade anstehenden Entscheidungsprozesses, der die selektive Aufmerksamkeit je nach Bedarf auf ganz bestimmte Inhalte richtet. Nicht zuletzt wird die Zahl der jeweils gleichzeitig verhandelbaren Argumente durch die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses begrenzt. Diese wiederum weist starke interindividuelle Variabilität auf und ändert sich zudem in Abhängigkeit von schwankender Konzentrationsfähigkeit und Wachheit.

Diese, als frei bewerteten, bewußten Deliberationen beruhen natürlich, wie alle anderen kognitiven Leistungen, auch auf neuronalen Prozessen, die vorwiegend in der Großhirnrinde ablaufen. Zu welchem Ergebnis der jeweilige Abwägungsprozeß konvergiert, hängt damit von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab. Zum einen sind das die Regeln, nach denen der Abwägungsprozess selbst erfolgt. Diese werden durch die funktionelle Architektur der Nervennetze, also durch die Verschaltungsweise der Nervenzellen, vorgegeben. Determinanten dieser Verschaltung wiederum sind zum einen genetische Faktoren, über welche das während der Evolution erworbene Wissen über die Bedingungen der Welt in Hirnarchitekturen übersetzt wird. Hinzu kommen die erfahrungsabhängigen frühkindlichen Prägungen, die

nachhaltige Modifikationen der genetisch vorgegebenen Verschaltung bewirken, und schließlich die vorangegangenen Lernprozesse, die über Veränderungen der Effizienz der Verbindungen die neuronalen Netzwerke und damit die von ihnen getragenen Funktionen bleibend verändern. Zudem hängt der Ablauf und damit der Ausgang des jeweiligen Abwägungsprozesses natürlich von der Aktivitätskonstellation ab, die sich im Netzwerk entwickelt hat. Diese Konstellation muß ein gewisses Maß an Instabilität erreicht haben, um den Prozeß in Gang zu bringen, der für den Beobachter als Entscheidungsprozeß in Erscheinung tritt. Auf der Ebene der neuronalen Netzwerke sind solche instabilen Zustände dadurch charakterisiert, daß unterschiedliche, sich ausschließende Aktivierungsmuster miteinander in Konkurrenz geraten. Dabei durchläuft das System eine Folge wechselnder Zustände, wobei aufgrund der nichtlinearen Dynamik solcher Trajektorien völlig neue Zustände auftreten können, bis sich schließlich wieder ein stabiler Zustand einschwingt, eine »Lösung« gefunden wurde, eine »Entscheidung« stattgefunden hat. Die dynamischen Zustände des Gesamtsystems hängen dabei nicht nur von der jeweiligen Vorgeschichte ab, sondern werden fortwährend von der Summe aller sensorischen Einwirkungen beeinflusst. Auch ein eben gehörtes Argument zählt zu diesen Einflüssen. Nach seiner Verarbeitung in den Sprachzentren bestimmt dieses als neuronales Erregungsmuster die Entwicklungstrajektorie des Systems in gleicher Weise wie etwa eine frühere Erfahrung, die in der Architektur des Netzwerkes gespeichert wurde.

Oft ist die Behauptung zu hören, unsere Entscheidungen seien frei, weil sie von Argumenten abhängig sind und auf der Ebene von Argumenten verhandelt werden können. Dies bestätigt die oben formulierte Vermutung, daß frei sein mit bewußt sein gleichgesetzt wird; denn sprachlich gefaßte Argumente sind Variablen, die grundsätzlich bewußtseinsfähig sind und in der Regel bewußt verarbeitet werden. Doch kann es sein, daß selbst früher gehörte, bewußt abgespeicherte Argumente im Augenblick der Entscheidungsfindung nicht den Weg ins Bewußtsein finden. Sie können dann im rationalen Abwägungsprozeß nicht mitverhandelt werden. Dennoch werden sie an den gleichzeitig ablaufenden, unbewußten Abwägungen teilhaben und den bewußten Deliberationsprozeß »unbemerkt« beeinflussen.

Aus hirnpfysiologischer Sicht beruhen jedoch auch die bewußt ablaufenden Prozesse auf neuronalen Wechselwirkungen, die nach Regeln ablaufen, welche durch die Verschaltung der daran beteiligten Hirn-

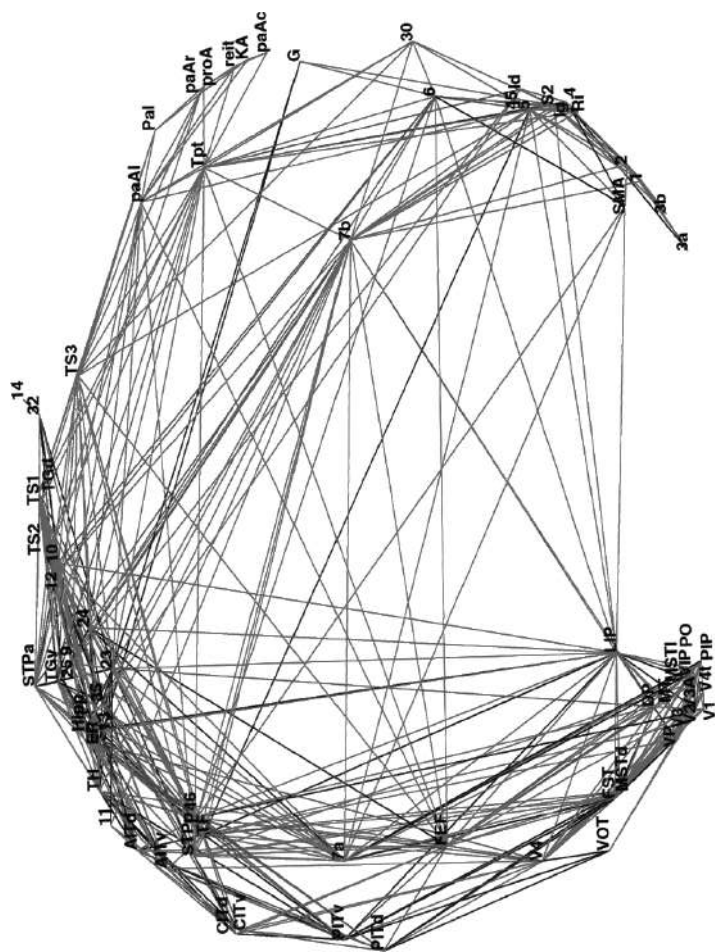


Abbildung 2: Am Beispiel der Großhirnrinde von Rhesusaffen lässt sich zeigen, wie sehr die kortikalen Areale miteinander vernetzt sind: Es entsteht eine komplexe Architektur. Die Zahlen und Buchstabenfolgen bezeichnen Hirnareale, die farbigen Striche stehen für massive, meist reziproke Verbindungen.

regionen festgelegt sind. Wäre dem nicht so, würden diese Prozesse also nicht determiniert, sondern lediglich die Folge aleatorischer Zustandsänderungen, dann könnte ein Gehirn keine an die Bedingungen angepaßten Entscheidungen fällen, könnte sich nicht auf Vorwissen verlassen und der aktuellen Situation Rechnung tragen. Ein Organismus, der so Entscheidungen trifft, würde am Leben scheitern. Bleibt also die Schlußfolgerung, daß auch die bewußten Entscheidungen, die sich vorwiegend auf deklaratives Wissen stützen, also auf meist sprachlich vermitteltes Kulturwissen, nach wie vor auf deterministischen Prozessen beruhen, die von einer kaum überschaubaren Vielfalt von Bedingungen abhängen, inneren und von außen herangetragenen. Dort wo die Entscheidung vorbereitet und gefällt wird, in den entsprechenden Nerven-netzen, verwandeln sich all diese Einflüsse in raumzeitlich strukturierte neuronale Erregungsmuster. Diese sind kompetitiven Selbstorganisationsprozessen unterworfen, deren Dynamik von der Systemarchitektur vorgegeben ist. Diese Prozesse bewirken, daß sich von vielen möglichen das jeweils stabilste, man könnte auch sagen, das jeweils konsistenteste beziehungsweise widerspruchsfreieste Erregungsmuster durchsetzt.

Wie also kann es sein, daß wir dennoch von freien und weniger freien Entscheidungen sprechen, und letzteren, wenn sie als Fehlentscheidungen gewertet werden, mildernde Umstände zuschreiben. Ich vermute, daß der Grund hierfür darin liegt, daß unsere Selbsterfahrung lehrt, daß an unseren Entscheidungen noch mehr Variablen teilhaben als solche, die uns jeweils bewußt werden. Diese im Unbewußten wirkenden Variablen stehen miteinander ebenso im Wettbewerb wie die bewußten, nach rationalen Regeln abwägbaren Argumente. Weil sie nicht im Bewußtsein aufscheinen, vermögen wir deren Wirken nicht zu benennen, sie beeinflussen Entscheidungen jedoch in hohem Maße. Einmal bestimmen sie mit, welche der »frei« verhandelbaren Argumente jeweils ins Bewußtsein gelangen, weil sie die Aufmerksamkeitsmechanismen steuern. Diese Aufmerksamkeit steuernde Wirkung der unbewußten Prozesse wird besonders deutlich, wenn man nach einem bestimmten Inhalt des deklarativen Gedächtnisses sucht, etwa einem Wort, und dieser bewußte Suchvorgang ergebnislos verläuft. Wir vertrauen es dann unbewußten Suchprozessen an, den entsprechenden Speicherinhalt zu suchen und ins Bewußtsein zu heben. Ferner nehmen wir die Wirkung unbewußter Abwägungsprozesse als Intuition wahr, als gutes oder schlechtes Gefühl, als angenehme oder unangenehme vegetative Begleiterscheinung des unbewußten Wettstreits. Diese unbe-

wußten Abwägungsprozesse laufen vermutlich nach anderen, einfacheren Regeln ab als die bewußten, die sich auf kulturell vereinbarte, in der Sprachlogik fixierte Regeln stützen. Dafür können aber im Unterbewußtsein sehr viel mehr Variablen gleichzeitig miteinander verrechnet werden als dies im Bewußtsein möglich wäre, weil die Kapazität des Bewußtseins in hohem Maße beschränkt ist. Der klinische Blick ist hierfür das adäquate Beispiel. Der erfahrene Arzt erfäßt eine Fülle von beobachtbaren Variablen, von denen ihm jeweils nur ein kleiner Teil wirklich bewußt wird, und vergleicht diese mit einem ungeheuren Erfahrungsschatz, von dem auch nur ein Bruchteil jeweils im Bewußtsein explizit ist, und urteilt nach, wie er sagt, seinem »Gefühl«. Meist ist er dabei ebenso treffsicher als wenn er Laborwerte explizit mit gespeicherten Normwerten vergleicht und daraus seine Schlußfolgerungen zieht.

Wir verfügen also über zwei parallel agierende Entscheidungsmechanismen, die sich gegenseitig beeinflussen, die aber nicht notwendig zu dem gleichen Ergebnis führen müssen. Im Fall von Widersprüchen sagen wir, wenn die unbewußten, sich in Intuitionen ausdrückenden Entscheidungsmechanismen über die expliziten, bewußten siegen, wir hätten uns wider besseres Wissen entschieden. Im umgekehrten Fall sagen wir, wir hätten gegen unser Gespür entschieden. In beiden Fällen haben wir das Gefühl, nicht ganz frei entschieden zu haben, und sind mit der Entscheidung nicht zufrieden. Dies verweist darauf, daß wir von einer wirklich freien Entscheidung noch mehr verlangen als nur, daß sie auf der Verhandlung bewußtseinsfähiger Argumente beruht. Wir wollen die Entscheidung auch frei wissen von Widersprüchen, die nicht selten als Zwang erlebt werden, die aus der Dissonanz zwischen unbewußten und bewußten Motiven entstehen. So betrachtet, gibt es dann quantitative Abstufungen hinsichtlich der Freiheit einer Entscheidung. Gänzlich frei, und im Sinne der Zurechenbarkeit von allen mildernden Umständen ausgenommen wären demnach Entscheidungen, die unter Heranziehung aller bewußtseinsfähigen Argumente frei von äußeren und inneren Zwängen getroffen werden. Unter äußeren Zwängen wären dabei alle Bedrohungen zu verstehen, die als Konsequenz einer bestimmten Entscheidung antizipiert werden. Zu den inneren Zwängen wären zu rechnen all die Faktoren, welche die Rekrutierung von bewußtseinsfähigen Argumenten einschränken, aber auch die unbewußten Motive, welche bewußte Entscheidungen in bestimmte Richtungen lenken. Ferner wäre Voraussetzung für so definierte »freie« Entschei-

dungen, daß zum Zeitpunkt der Entscheidung keine, das Bewußtsein und dessen Kapazität einschränkenden Bedingungen herrschen dürfen.

Ich denke, daß bei dieser Betrachtungsweise deutlich wird, wie fragwürdig der Versuch ist, jeweils im Nachhinein festzustellen, wie frei eine bestimmte Entscheidung war, wobei mit »frei« nur gemeint ist, wie unbehindert von äußeren und inneren Zwängen der bewußte Deliberationsprozeß ablaufen konnte, auch wenn dieser selbst sich natürlich deterministischen neuronalen Prozessen in der Großhirnrinde verdankt. Eine objektive Feststellung dieser Freiheit ist jedoch erforderlich, wenn Freiheit als Voraussetzung für Schuldfähigkeit gesehen, und diese wiederum zur Strafbemessung herangezogen wird. Das dem so ist, geht aus der Praxis hervor. Richter sehen sich offensichtlich häufig außerstande, diese Abwägung vorzunehmen und bemühen dann den forensischen Psychiater. Dieser verfügt über einen Katalog etablierter Kriterien zur Abgrenzung von normalen und pathologischen psychischen Konstellationen. Er kann dem Richter Auskunft darüber geben, ob die Hirnfunktionen des Täters hinsichtlich bestimmter Eigenschaften der Norm entsprechen. Dabei wird offensichtlich vor allem geprüft, ob der Delinquent in der Lage war, in vollem Besitz seines Bewußtseins zu entscheiden. Was aber ist damit gewonnen, wenn auch der bewußte Deliberationsprozeß auf neuronalen Vorgängen beruht, die ihrerseits durch genetische Dispositionen, frühe Prägungen und erlernte Routinen in idiosynkratischer Weise in einer für das Individuum spezifischen Weise ablaufen. Es läßt sich dann lediglich die Feststellung machen, daß der bewußte Deliberationsprozeß, der zu der fatalen, strafwürdigen Entscheidung führte, zwar frei von sichtlichen äußeren und inneren Zwängen ablaufen konnte, daß er aber den bekannten Ausgang nahm, weil die, den neuronalen Abwägungsprozeß determinierenden Bedingungen so ausgelegt sind, daß eben diese und keine andere Entscheidung fallen konnte.

Folgendes Beispiel macht die Problematik des Versuchs deutlich, das Maß der jeweils verfügbaren »Freiheit« und damit die Größe der subjektiven »Schuld« zu objektivieren. Findet sich bei einem Delinquenten, der ganz offensichtlich bei vollem Bewußtsein und ohne Zeitdruck eine fatale Aktion ausgeführt hat, durch Zufall im Nachhinein eine Läsion im Präfrontalhirn, welche die Bahnen unterbrochen hat, die den Ort, wo ethische Normen gespeichert sind, mit den Zentren verbinden, deren Aktivierung erforderlich ist, um Handlungen zu unterdrücken, so würden dem Delinquenten im nachhinein mildernde Umstän-

de zugesprochen. Den gleichen Effekt wie makroskopisch feststellbare Läsionen können jedoch unsichtbare Fehlverschaltungen haben, die ihrerseits auf vielfältigste Ursachen zurückgehen können. Hierzu zählen genetische Dispositionen, fehlerhaft verlaufene Entwicklungs- und Prägungsprozesse und die ungenügende oder falsche Einschreibung von Lerninhalten. Ferner muß mit ebenfalls unsichtbaren und im nachhinein nicht mehr nachvollziehbaren Veränderungen im Gleichgewicht neurochemischer Prozesse gerechnet werden oder mit akzidentellen Entgleisungen der Systemdynamik. Es muß also davon ausgegangen werden, daß jemand tat, was er tat, weil just in dem Augenblick sein Gehirn zu keiner anderen Entscheidung kommen konnte, gleichgültig, wieviel bewußte oder unbewußte Faktoren tatsächlich beigetragen haben.

Daraus folgt selbstverständlich nicht, daß abweichendes Verhalten nicht sanktioniert werden darf. Denn dann dürften wir auch unsere Kinder, denen wir Schuldfähigkeit absprechen, weil sie nur über eine eingeschränkte deklarative Kompetenz verfügen und weniger als Erwachsene zur bewußten Verarbeitung von Argumenten fähig sind, für das, was sie tun, weder bestrafen noch belobigen. Wir ziehen die Kinder zur Rechenschaft für das, was sie tun, selbst wenn wir ihnen nur begrenzte Schuldfähigkeit zuschreiben, denn wir machen sie verantwortlich für das, was sie tun. Wir bestrafen und belohnen das Kind in der Absicht, seine Hirnarchitektur so zu prägen, daß es später Entscheidungen treffen wird, die mit den sozialen Normen der Gesellschaft, in welche es integriert werden soll, konform sind.

Und so stellt sich die Frage, ob es nicht zur Klarheit beitrüge, wenn man andere Terminologien verwendete. Selbstverständlich bleibt die Notwendigkeit zur Zuschreibung von Verantwortung unberührt, denn wer sonst als das handelnde Individuum könnte die Tat verantworten. Nachdem sich das, was mit »Freiheit« gemeint ist, offensichtlich nur auf einen kleinen Teil der kognitiven Leistungen von Gehirnen bezieht, nämlich auf die Fähigkeit zur bewußten Abwägung von Argumenten, also Inhalten des deklarativen Gedächtnisses, wäre es vielleicht tunlicher, von Mündigkeit zu sprechen. Je mündiger eine Person ist, umso mehr ist sie in der Lage, sich Argumente bewußt zu machen und diese nach sprachlogischen Regeln, welche die jeweilige Gesellschaft vorgibt, abzuwägen und dabei jenes Wissen heranzuziehen, das im deklarativen Gedächtnis gespeichert ist. Dabei handelt es sich ganz vorwiegend um explizites, sprachlich faßbares Wissen. Mündigkeit also, verstanden im

Sinne von Sagbarkeit. Was also geschähe, wenn wir den diffusen und mit unterschiedlichsten Konnotationen befrachteten Begriff der Freiheit aufgäben und statt dessen sprächen von der Kohärenz oder Inkohärenz bewußter und unbewußter Prozesse, von der interindividuell stark schwankenden Fähigkeit zur rationalen Verhandlung bewußtseinsfähiger Inhalte (diese Fähigkeit könnte man als Mündigkeit bezeichnen) und von Strafe als Sanktion für abweichendes Verhalten, die sich nicht an der Schwere der subjektiven Schuld orientiert, sondern lediglich an der Normabweichung der Handlung. Zumindest im akademischen Bereich könnte diese Begriffsklärung hilfreich sein. Gleichwohl kann es sich als zweckmäßig erweisen, im Rechtsalltag und im Selbstverständnis der Gesellschaft an den Begriffen »Freiheit«, »Schuld« und »Strafe für Schuld« festzuhalten, weil jeder, der in unserem Kulturkreis erzogen wurde, damit zwar vage, aber zumindest konsensfähige Inhalte seiner Selbsterfahrung benannt findet.

Warum erfahren wir unsere Entscheidungen als frei?

Falls zutrifft, was die Hirnforschung über die neuronalen Grundlagen von Entscheidungsprozessen behauptet, stellt sich die Frage, wie es sein kann, daß sich unsere Intuition irrt, wenn sie sich auf das Organ richtet, dem sie sich verdankt, wenn sie zu ergründen sucht, wie unsere Gehirne organisiert sind und nach welchen Prinzipien sie ihre erstaunlichen Leistungen erbringen. Wie kann es sein, daß die Selbstauskunft, die ein kognitives System über sich gibt, nicht übereinstimmt mit den Ergebnissen, die es erzielt, wenn es sich mit naturwissenschaftlichen Methoden daran macht, seine Bedingungen zu erforschen? Warum haben wir kein rechtes Gefühl für die Funktionsabläufe in unserem Gehirn, die dieses Gefühl hervorbringen? Wie eingangs erwähnt, scheint es uns, als gäbe es in unserem Kopf eine zentrale Instanz, die wir mit unserem bewußten Ich gleichsetzen und die über all die wunderbaren Fähigkeiten verfügt, die uns Menschen ausmachen. Offenbar vermag es diese Instanz, sich der Signale unserer Sinnesorgane zu bedienen, um ein kohärentes Bild der Welt zu entwerfen und sich als autonom agierendes Wesen in einer als lückenlos wahrgenommenen Welt zu erleben. Sie vermag die Objekte der Welt zu benennen und in Kategorien zu ordnen,

Wissen über die Welt zu erlangen und zu speichern, die Gesetzmäßigkeiten von Wechselwirkungen zu erfassen, daraus Schlüsse zu ziehen, Voraussagen zu formulieren, Entscheidungen zu treffen, Handlungen zu planen und auszuführen, diese Prozesse mit wertenden emotionalen Konnotationen zu versehen und sich all dieser Vorgänge zudem bewußt zu sein, sie sich vor dem inneren Auge zu gewärtigen. Weil diese Intuition so evident ist, nimmt nicht Wunder, daß im Laufe der Kulturgeschichte immer wieder Spekulationen darüber angestellt wurden, wo im Gehirn diese allmächtige und alles kontrollierende Instanz sich konstituieren könnte. Es müsse dies, so die plausible Annahme, ein singulärer Ort sein, an dem alle Informationen über die inneren und äußeren Bedingungen verfügbar sind, an dem Entscheidungen getroffen werden und von wo aus alle Handlungen initiiert werden. Selbst Descartes, der die mentalen Prozesse als nicht an die materiellen Vorgänge im Gehirn gebunden, sondern diesen vorgängig sah, der also für die frei schwebende »res cogitans« eigentlich keiner Verortung bedurft hätte, selbst Descartes glaubte, nicht ohne eine singuläre lokalisierbare Instanz auskommen zu können. Zumindest die an neuronales Substrat gebundenen materiellen Prozesse im Gehirn bedürften einer zentralistischen Organisation, bedürften eines Zentrums, in dem alle sensorischen und exekutiven Funktionen miteinander verbunden werden können.

Wie oben angedeutet, könnte der Gegensatz zwischen dieser, aus der Intuition gespeisten Vorstellung über die Organisation unseres Gehirns und den heute verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen kaum drastischer sein. Da aus der Intuition gespeiste Vorstellungen allen Menschen gleichermaßen zugänglich sind, neurobiologische Erkenntnisse aber gemeinhin als Expertenwissen gewertet werden, soll auf letztere hier etwas ausführlicher eingegangen werden. Untersuchungen der strukturellen und funktionellen Organisation unseres Gehirns belegen, daß es sich hierbei um ein Organ handelt, das in hohem Maße dezentral und distributiv organisiert ist, daß in ihm eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessen parallel in sensorischen und motorischen Subsystemen ablaufen und daß es kein singuläres Zentrum gibt, welches diese verteilten Prozesse verwaltet. An der funktionellen Organisation der Großhirnrinde läßt sich dies besonders gut veranschaulichen. Die Hirnrinde ist die letzte große Erfindung in der Evolution von Gehirnen, denn seit ihrem ersten Auftreten bei niederen Wirbeltieren gab es keine wesentlichen strukturellen Neuerungen. Im Laufe der Evolution nimmt das Volumen der Hirnrinde kontinuierlich zu, wo-

durch sich die Komplexität der Vernetzungsmöglichkeiten dramatisch erhöht, aber die interne Verschaltung der neuen Areale bleibt unverändert. Es bestätigt dies aufs neue, wie konservativ die Evolution ist. Nicht nur, daß die molekularen Bausteine von Nervenzellen und die Mechanismen der Signalübertragung seit dem Auftreten einfacher Nervenetze bei Mollusken nahezu unverändert erhalten geblieben sind, auch die Regeln, nach denen Nervenetze Information verarbeiten und speichern, haben sich seither nur wenig verändert. Die bestimmenden Entwicklungsschritte beruhten im wesentlichen auf einer ungeheuren Zunahme der Komplexität der Vernetzung von Nervenzellen, die in der Großhirnrinde des Menschen ihren vielleicht nur vorläufigen, vielleicht aber auch endgültigen Höhepunkt erreicht hat. Die Großhirnrinde ist modular aufgebaut, wobei ein Modul einem Gewebezylinder mit einem Radius von einem halben Millimeter und einer Länge von etwa 2 Millimetern – also der Dicke der Großhirnrinde entspricht. In einer solchen Gewebesäule, in der Fachsprache nennen wir sie Kolumne, drängen sich, in sechs Schichten angeordnet, etwa 100.000 Nervenzellen, von denen jede mit durchschnittlich 20.000 anderen kommuniziert. Die Gesprächspartner können dabei in unmittelbar benachbarten Kolumnen, aber auch in weit entfernten Hirnstrukturen liegen. Bemerkenswert ist bei dieser astronomisch anmutenden Komplexität, die in ihrer Dimensionalität der des Universums nicht nachsteht, die globale Gleichförmigkeit. Die Verschaltung der Nervenzellen innerhalb solcher Kolumnen ist naturgemäß von außerordentlicher Komplexität und nur im Groben aufgeklärt, aber sie folgt festen Regeln und diese sind für alle Kolumnen gleich. Da die Verarbeitungsprozesse in Nervenetzen anders als in Computern nicht von getrennten Programmen gesteuert werden, sondern ausschließlich durch die Verschaltung der Nervenzellen determiniert werden, folgt, daß die von diesen Modulen erbrachten Rechenoperationen für alle Hirnrindenareale dieselben sind, ob sie sich mit der Verarbeitung von visuellen, akustischen oder taktilen Signalen befassen oder der Analyse von Sprache oder der Programmierung von Bewegungen. Der Evolution ist hier offensichtlich die Realisierung eines informationsverarbeitenden Prinzips gelungen, das sich zur Bewältigung unterschiedlichster Aufgaben gleichermaßen eignet. Dies stellt uns vor zwei noch nicht befriedigend beantwortbare Fragen: Erstens, welches mächtige und universelle Prinzip ist hier verwirklicht? Und zweitens, wie kann es sein, daß durch die Vermehrung solcher universeller Module all die neuen Phänomene in die Welt kamen, die wir

mit mentalen Prozessen verbinden und die uns so nachhaltig von anderen Primaten unterscheiden; Qualitäten, die es uns Menschen erlaubten, der biologischen Evolution die kulturelle hinzuzufügen? Daß komplexe Systeme fähig sind, durch quantitative Vermehrung ihrer Komponenten Phasenübergänge zu neuen Aggregatzuständen zu durchlaufen und dabei Eigenschaften hervorzubringen, die sich qualitativ nicht nur von den Komponenten, sondern auch von bisherigen Zuständen unterscheiden, ist uns geläufig. Aber wie ist vorstellbar, daß allein die Vermehrung von Großhirnrinde und der dazugehörigen Servicestrukturen zur Emergenz von Leistungen führte, die es uns erlaubten, der materiellen Welt eine geistige Dimension hinzuzufügen, uns unserer Wahrnehmungen und Gefühle gewahr zu werden, eine Innensicht unserer psychischen Verfaßtheit zu gewinnen und diese Fähigkeit auch unserem Gegenüber zuzuschreiben? Wir erfahren diese mentalen Phänomene als ebenso real wie die greifbaren Phänomene der dinglichen Welt, wir können sie benennen, sprachlich fassen und uns in diesen Konstrukten der materiellen Welt als autonome Wesen gegenüberstellen, die über eine geistige Dimension verfügen. In dieser Dimension, existieren benennbare Phänomene, die in der materiellen Welt keine Entsprechung haben und die traditionell Forschungsgegenstand der Geisteswissenschaften sind: Empfindungen, Wertungen, Moral, Intentionalität, Schuld, ästhetische Kategorien, kurzum, all das, was erst durch den Menschen in die Welt kam. Was also ist geschehen?

Die Evolution hat die Module der Hirnrinde hervorgebracht und einen genialen Weg entdeckt, diese so miteinander zu verschalten, daß durch deren Vermehrung immer differenziertere kognitive Leistungen realisiert werden konnten. In Gehirnen mit vergleichsweise niedriger Komplexität finden sich diese Module zu einigen wenigen sensorischen und motorischen Rindenarealen zusammengefaßt. Diesen Arealen obliegt es, die Signale aus den verschiedenen Sinnesorganen zu verarbeiten, sie mit der in ihnen gespeicherten Information zu vergleichen, und so aufzubereiten, daß die motorischen Areale daraus angepaßte Verhaltensreaktionen ableiten können. Dabei kommunizieren die verschiedenen Sinnessysteme mit den exekutiven Strukturen über kurze Wege und vermitteln ihre Botschaften parallel und weitestgehend unabhängig voneinander. Dies ist der Grund, warum niedere Tiere nicht gut generalisieren, nicht gut vom einen aufs andere schließen können. In komplexeren Gehirnen kommen immer mehr Areale hinzu, die sich nicht mehr direkt mit der Verarbeitung sensorischer Signale befassen,

sondern vorwiegend mit der Weiterverarbeitung und Rekombination der Ergebnisse, die in den vorgelagerten, evolutionär älteren Arealen erarbeitet wurden. Bei Primaten widmen sich allein etwa 30 verschiedene, vorwiegend parallel arbeitende und eng miteinander vernetzte Areale den verschiedenen Aspekten der von den Augen erfaßten und in der primären Sehrinde aufbereiteten visuellen Signale. Ein ventraler Teil analysiert Aspekte, die der Identifikation und Klassifikation von Objekten dienen, Konturlinien, Formmerkmale, Texturen, Farbwerte und viele mehr. Ein dorsaler Teil befaßt sich mit Merkmalen, die erfaßt werden müssen, um Objekte zielsicher greifen und manipulieren zu können, also deren äußere Form, Position und Bewegung. Verletzungen der ventralen Areale führen entsprechend zu Ausfällen der Formwahrnehmung: Objekte verlieren ihre Farbe oder Gesichter können nicht mehr erkannt werden, und in extremen Fällen wird es unmöglich, Objekte überhaupt zu identifizieren und zu benennen. Man spricht dann von visueller Agnosie. Erhalten bleibt dabei die Fähigkeit, Bewegungen wahrzunehmen oder Objekte zu greifen und ihrer Funktion entsprechend zu manipulieren. Umgekehrt verlieren Patienten mit Läsionen im dorsalen Verarbeitungspfad die Fähigkeit, Objekte zu ergreifen und zu manipulieren, haben jedoch kein Problem, sie zu erkennen und zu benennen. Man spricht dann von visueller Ataxie.

Parallel zur Vermehrung dieser höheren sensorischen Areale, die sich in allen Sinnesmodalitäten vollzieht, treten Areale hinzu, die sich mit der Vermittlung zwischen den Modalitäten befassen, die Assoziationsareale. Ihnen obliegt es, Gleiches im Verschiedenen herauszuarbeiten und modalitätsunabhängige, abstraktere Repräsentationen von Wahrnehmungsobjekten zu erstellen. In den Spracharealen des Menschen erreicht diese symbolhafte Erfassung des Wahrgenommenen seine höchste Abstraktion. Hinzu kommen Areale im Frontalhirn, die sich mit der Abspeicherung und Bearbeitung vorverarbeiteter, hoch abstrahierter Inhalte befassen wie sozialen Wertesystemen und Verhaltenscodices. Benachbarten Arealen obliegt es, die Ergebnisse der vielen gleichzeitig ablaufenden Prozesse gegeneinander abzuwägen, ausgewählte mit Aufmerksamkeit zu belegen und solange im Kurzzeitspeichern abzulegen, bis sie entweder nicht mehr gebraucht oder in die Langzeitspeicher verschoben werden. Und schließlich hat sich in den Stirn- und Schläfenlappen ein Netzwerk von Arealen herausgebildet, das uns befähigt, uns als mit uns identisch zu begreifen. Dieses Netzwerk reift auch in

der Individualentwicklung spät aus, weshalb kleine Kinder noch keine Vorstellung von ihrer Identität entfalten können.

Die gegenwärtig plausibelste Annahme ist, daß sich die hohen, spezifisch menschlichen kognitiven Leistungen dem Auftreten von Hirnrindenarealen verdanken, deren Aufgabe es ist, die Verarbeitungsergebnisse aus bereits vorhandenen Arealen in vielfältigen Rekombinationen erneut zu bearbeiten – und zwar nach den gleichen Algorithmen, die von sensorischen Arealen bei der Bearbeitung von Sinnessignalen angewandt werden. Diese Iteration von kognitiven Operationen immer gleichen Grundmusters befähigt uns offenbar, über hirninterne Vorgänge Protokoll zu führen, uns unserer eigenen sensorischen Prozesse gewahr zu werden, sie zu benennen und uns der Entscheidungen und Handlungsentwürfe, die sich im System konstituieren, zumindest zum Teil bewußt zu werden.

Faszinierend ist dabei die Geschlossenheit der hochentwickelten Gehirne. Nervenzellen in evolutionsgeschichtlich jungen Arealen kommunizieren ausschließlich mit ihresgleichen. Im Vergleich zu den Myriaden von Verbindungen zwischen den zig Milliarden von Hirnrindenneuronen spielen die Verbindungen mit den Sinnesorganen und den Effektoren nur mehr eine marginale Rolle. So machen die Verbindungen zwischen den Augen und den Neuronen in der primären Sehrinde gerade einmal 1% der Synapsen, der Kontakte zwischen Nervenzellen aus. Hochentwickelte Gehirne beschäftigen sich also vorwiegend mit sich selbst und verhandeln die ungeheure Menge von Informationen über die Welt, die in ihrer Architektur gespeichert ist. So kommt es, daß sich die Aktivitätsmuster, die auftreten, wenn sich Menschen etwas vorstellen oder das Vorgestellte tatsächlich vor Augen haben, kaum unterscheiden. Im Traum und bei Halluzinationen verschwinden diese Unterschiede gänzlich, weshalb dann Imagination und Realität eins werden.

Wenn es im Gehirn keine zentrale, allen Subprozessen übergeordnete Instanz gibt, wie wird dann die Zusammenarbeit der Milliarden von Zellen in den mit verschiedenen Aufgaben betrauten Arealen der Großhirnrinde koordiniert, wie kann das Gehirn als Ganzes stabile Aktivitätsmuster ausbilden, wie können sich die verteilten Verarbeitungsprozesse zur Grundlage kohärenter Wahrnehmungen formieren, wie findet ein so distributiv organisiertes System zu Entscheidungen, woher weiß es, wann die verteilten Verarbeitungsprozesse ein Ergebnis erzielt haben, wie beurteilt es die Verlässlichkeit des jeweiligen Ergebnisses, und wie vermag es fein aufeinander abgestimmte Bewegungen

zu steuern? Auf irgendeine Weise müssen die Ergebnisse der verteilten sensorischen Prozesse zusammengebunden werden, weil unsere Wahrnehmungen kohärent und nicht fragmentiert sind; und auch für die Steuerung des Gesamtsystems und die Koordination von Handlungen scheint eine zentrale Instanz unerlässlich. Wie bereits angedeutet, gibt es aber weder einen singulären Ort, zu dem alle sensorischen Systeme ihre Ergebnisse senden könnten, noch gibt es eine zentrale Lenkungs- und Entscheidungsinstanz. Offensichtlich hat die Evolution das Gehirn mit Mechanismen zur Selbstorganisation ausgestattet, die in der Lage sind, auch ohne eine zentrale koordinierende Instanz Subprozesse zu binden und globale Ordnungszustände herzustellen. Der Vergleich mit Superorganismen liegt nahe. Auch Ameisenstaaten kommen ohne Zentralregierung aus. Die Mitglieder des Staates kommunizieren über ein eng gewebtes Netzwerk von Signalsystemen und passen ihr individuelles Verhalten entsprechend der lokal verfügbaren Information an. Auch hier hat die Evolution eine geniale Interaktionsarchitektur entwickelt, die sicher stellt, daß sich die Myriaden der lokalen Wechselwirkungen zu global geordneten Systemzuständen fügen.

Wir sind vermutlich noch weit davon entfernt, die Prinzipien zu verstehen, nach denen sich die verteilten Prozesse im Gehirn zu kohärenten Zuständen verbinden, die dann als Substrat von Wahrnehmungen, Vorstellungen, Entscheidungen und Handlungssequenzen dienen könnten. Wir verfügen jedoch über eine experimentell überprüfbare Hypothese, die sich am Beispiel von Bindungsproblemen verdeutlichen läßt, die bei der Verarbeitung sensorischer Signale auftreten. Aufgrund ihrer spezifischen Verschaltung reagieren die Nervenzellen in der Sehrinde selektiv auf elementare Merkmale visueller Objekte: auf Konturen, Texturen, Farbkontraste und Bewegungen. Da sich auf höheren Verarbeitungsstufen Neuronen finden, die auf relativ komplexe Kombination solcher elementaren Merkmale ansprechen, wurde vermutet, daß die Bindung elementarer Merkmale zu Repräsentationen ganzer Objekte dadurch erfolgen könnte, daß die Antworten der elementaren Merkmalsdetektoren in Zellen höherer Ordnung so integriert werden, daß diese Zellen selektiv auf die Merkmalskonstellation einzelner Objekte reagieren. Es müßte dann für jedes wahrgenommene Objekt eine spezialisierte Nervenzelle geben, deren Antwort das Vorhandensein eben dieses Objektes signalisiert. Diese Erwartung ließ sich experimentell nicht bestätigen, und es gibt gute Gründe, warum die Natur diese Option zur Bindung verteilter neuronaler Signale nur für die Reprä-

sensation sehr häufig vorkommender oder sehr bedeutsamer Objekte gewählt hat. Es würde diese Strategie eine astronomisch große Zahl hochspezialisierter Zellen erfordern, um alle wahrnehmbaren Objekte in all ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen zu repräsentieren. Zudem wäre es unmöglich, neue, noch nie gesehene Objekte zu repräsentieren und wahrzunehmen, da schwer vorstellbar ist, daß sich im Laufe der Evolution für alle möglichen Objekte entsprechend spezialisierte Zellen ausgebildet haben. Hochentwickelte Gehirne wenden deshalb eine komplementäre, wesentlich flexiblere Strategie an. Objekte der Wahrnehmung, gleich ob es sich um visuell, akustisch oder taktil erfaßte handelt, werden durch eine Vielzahl von gleichzeitig aktiven Neuronen repräsentiert, wobei jedes einzelne nur einen Teilaspekt des gesamten Objektes kodiert.

Die nicht weiter reduzierbare neuronale Entsprechung eines kognitiven Objektes wäre demnach ein raumzeitlich strukturiertes Erregungsmuster in der Großhirnrinde, an dessen Erzeugung sich jeweils eine große Zahl von Zellen beteiligt. Ähnlich wie mit einer begrenzten Zahl von Buchstaben durch Rekombination nahezu unendlich viele Worte und Sätze gebildet werden können, lassen sich durch Rekombination von Neuronen, die lediglich elementare Merkmale kodieren, nahezu unendlich viele Objekte der Wahrnehmung repräsentieren, selbst solche, die noch nie zuvor gesehen wurden. An der Repräsentation eines freudig bellenden, mit dem Schwanz wedelnden, gerade getätschelten Hundes müssen sich Neuronen aus weit entfernten Hirnrindenarealen zu einem kohärenten Ensemble zusammenschließen: Zellen des Sehsystems, die visuelle Attribute des Hundes kodieren, müssen mit Zellen des auditorischen Systems kooperieren, welche sich an der Kodierung des Gebells beteiligen, Zellen des taktilen Systems müssen Informationen über die Beschaffenheit des Fells beisteuern und Zellen des limbischen Systems werden benötigt, um emotionale Bewertungen hinzuzufügen, um anzugeben, ob das Gebell freudig oder bedrohlich ist. All diese verteilten Informationen müssen zu einem kohärenten Gesamteindruck zusammengebunden werden, ohne sich an einem bestimmten Ort zu vereinen. Ferner muß dafür gesorgt werden, daß nur die Signale miteinander gebunden werden, die vom gleichen Objekt herrühren, daß die Signale vom Hund getrennt bleiben von Signalen, die von anderen, gleichzeitig wahrgenommenen Objekten herrühren, von Kindern etwa, die sich an der Streichelaktion beteiligen und einer miauenden Katze, die ebenfalls Zuwendung sucht. Bei dieser Kodie-

rungsstrategie müssen die Erregungsmuster der Neuronen demnach zwei Botschaften gleichzeitig vermitteln. Zusätzlich zu der Botschaft, daß das Merkmal, für welches sie kodieren, vorhanden ist, müssen sie angeben, mit welchen anderen Neuronen sie gerade gemeinsame Sache machen. Einigkeit besteht, daß die Amplitude der Erregung eines Neurons Auskunft darüber gibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Merkmal vorhanden ist. Heftig diskutiert wird jedoch die Frage, worin die Signatur bestehen könnte, die angibt, welche Neuronen jeweils gerade miteinander verbunden sind und ein kohärentes Ensemble bilden.

Wir haben vor mehr als einer Dekade beobachtet, daß Neurone in der Sehrinde ihre Aktivitäten mit einer Präzision von einigen tausendstel Sekunden synchronisieren können, wobei sie meist eine rhythmisch oszillierende Aktivität in einem Frequenzbereich um 40 Hz annehmen. Wichtig war dabei die Beobachtung, daß Zellen vor allem dann ihre Aktivität synchronisieren, wenn sie sich an der Kodierung des gleichen Objektes beteiligen. Wir leiteten daraus die Hypothese ab, daß die präzise Synchronisierung von neuronalen Aktivitäten die Signatur dafür sein könnte, welche Zellen sich temporär zu funktionell kohärenten Ensembles gebunden haben. Wie so oft erweist es sich, daß die ursprüngliche Beobachtung nur die Spitze des Eisbergs war und daß die funktionellen Bedeutungen der beobachteten Synchronisationsphänomene weit über die zunächst vermuteten hinausgehen. Die vielleicht spannendsten Implikationen könnten die jüngsten Untersuchungen an schizophrenen Patienten haben. Sie verweisen darauf, daß in den Gehirnen dieser Patienten die Synchronisation neuronaler Aktivitäten gestört und unpräzise ist. Wenn zutrifft, daß Synchronisation der Koordination von parallel erfolgenden, räumlich verteilten neuronalen Operationen dient, könnte dies manche der dissoziativen Phänomene erklären, welche diese geheimnisvolle Krankheit charakterisieren. Die Befunde könnten dann tatsächlich Hinweise für eine gezielte Suche nach den pathophysiologischen Mechanismen liefern, die zu dieser Erkrankung führen.

Vieles spricht also dafür, daß wir uns als neuronales Korrelat von Wahrnehmungen komplexe, raumzeitliche Erregungsmuster vorstellen müssen, an denen sich jeweils eine große Zahl von Nervenzellen in wechselnden Konstellationen beteiligen. Je nach der Struktur des Wahrgenommenen können solche koordinierten Zustände weite Bereiche der Großhirnrinde umfassen. Da wir in der Regel mehrere Objekte

Synchrone oszillatorische Antworten in der Sehrinde auf ein bewegtes Gittermuster

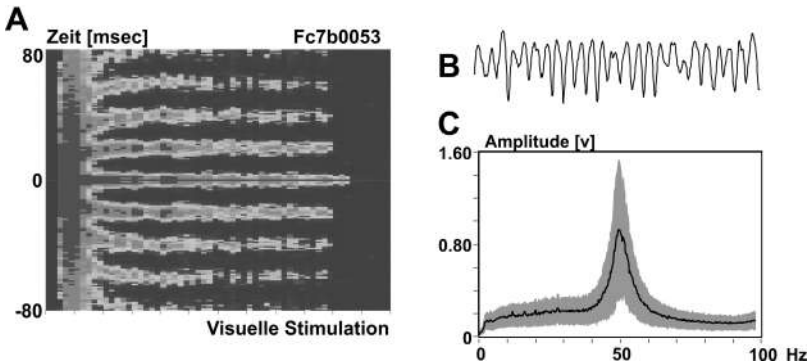


Abbildung 3: A: Dieses zeitaufgelöste Kreuzkorrelogramm zeigt, dass Neuronen an zwei unterschiedlichen Orten der Sehrinde nach Beginn der visuellen Stimulation synchron zu oszillieren beginnen und diese Synchronisierung im 50 Hz Bereich über die gesamte Reizdauer anhält. B: Im gleichzeitig abgeleiteten Summenpotential drückt sich diese Synchronisation in periodische Potenzialschwankungen aus. C: Die Spektralanalyse der in B dargestellten oszillatorischen Aktivität zeigt ein deutliches Maximum im Bereich von 50 Hz.

gleichzeitig wahrnehmen, zwischen ihnen Bezüge herstellen und diese im Kontext der einbettenden Umgebung erfahren, müssen sich zudem in den Nervennetzen der Großhirnrinde mehrere unterschiedliche Ensembles ausbilden können, die zwar voneinander getrennt sein, aber doch in Wechselwirkung stehen müssen. Noch wissen wir nicht, wie dies bewerkstelligt wird. Eine Möglichkeit wäre, daß Ensembles, die unterschiedliche Objekte repräsentieren, in unterschiedlichen Frequenzbereichen synchron schwingen. Wie immer auch die Lösungen für die vielfältigen Koordinationsprobleme in unseren dezentral organisierten Gehirnen aussehen werden, fest steht schon jetzt, daß die dynamischen Zustände der vielen Milliarden miteinander wechselwirkenden Neuronen der Großhirnrinde ein Maß an Komplexität aufweisen, das unser Vorstellungsvermögen übersteigt. Dies bedeutet nicht, daß es uns nicht gelingen kann, analytische Verfahren zu entwickeln, mit denen sich diese Systemzustände erfassen und in ihrer zeitlichen Entwicklung verfolgen lassen. Aber die Beschreibungen dieser Zustände werden abstrakt und unanschaulich sein. Sie werden keine Ähnlichkeit aufweisen

mit den Wahrnehmungen und Vorstellungen, die auf diesen neuronalen Zuständen beruhen.

Intuitiv nachvollziehbar ist uns vielleicht noch, daß die Wahrnehmung komplexer dynamischer Strukturen wie Sprache oder Musik auf einer Abfolge ebenfalls komplexer, sich ständig wandelnder Erregungsmuster beruhen muß. Doch selbst hier wird es sich keinesfalls um isomorphe Abbildungen handeln. Tonhöhen werden nicht einfach in neuronale Schwingungen unterschiedlicher Frequenz umgesetzt, sondern sie werden wie Merkmale behandelt, für deren Kodierung Nervenzellen vorgesehen sind. Gänzlich kontraintuitiv ist die Vorstellung, daß das neuronale Korrelat der Wahrnehmung eines taktil oder visuell erfaßten soliden Objekts ebenfalls ein hoch abstraktes räumlich und zeitlich strukturiertes Erregungsmuster sein könnte und daß die Repräsentation eines dreidimensionalen, greifbaren Objektes auf die gleiche Weise erfolgen könnte wie die Repräsentation eines Geruches, einer Emotion oder einer Handlungsintention. Immer wird es sich um einen von nahezu unendlich vielen möglichen Zuständen handeln, den ein komplexes System mit hochgradig nichtlinearer Dynamik einzunehmen in der Lage ist. Anders ausgedrückt könnte man sagen, das System bewege sich fortwährend von einem Punkt zum nächsten in einem unvorstellbar hochdimensionalen Raum möglicher Zustände, wobei die Trajektorie dieser Bewegung von der Gesamtheit aller inneren und äußeren Einwirkungen abhängt, denen das System ausgesetzt ist. Auf dieser Wanderung verändert sich das System fortwährend, weil seine funktionelle Architektur durch die dabei gemachten Erfahrungen ständig verändert wird. Es kann deshalb niemals je an den gleichen Ort zurückkehren, und dies ist der Grund dafür, daß wir Zeit als nicht umkehrbar erleben. Das gleiche Objekt wird, wenn es zum zweiten Mal gesehen wird, einen anderen dynamischen Zustand bewirken als beim ersten Mal, es wird zwar als das Gleiche erkannt werden, aber in dem neuen Zustand wird mitkodiert, daß es schon einmal gesehen wurde.

Diese Überlegungen lassen erahnen, mit welch abstrakten Beschreibungen von Systemzuständen wir es zu tun haben werden, wenn wir tiefer in die funktionellen Abläufe unserer Gehirne eindringen, und sie bringen uns zurück zu der eingangs gestellten Frage, warum unser Vorstellungsvermögen so wenig geeignet ist, über die Vorgänge im Gehirn Auskunft zu geben, die diesem Vermögen zu Grunde liegen.

Ich vermute, daß es an der evolutionären Anpassung unserer kognitiven Leistungen an eine Welt liegt, in der es keinen Vorteil brachte, sich mit nichtlinearen, hochdimensionalen dynamischen Prozessen zu befassen. Eine der wichtigsten Funktionen von Nervensystemen ist, lebensnotwendige Information aus der Umwelt aufzunehmen, Gesetzmäßigkeiten ausfindig zu machen, daraus zutreffende Modelle abzuleiten und aufgrund dieses Wissens optimal angepaßte Verhaltensstrategien zu entwerfen. All dies dient der Sicherung des Überlebens in einer gefährlichen, sich stetig wandelnden Welt. Die Größe von Tieren, die Nervensysteme entwickelt haben, variiert im Bereich von Millimetern bis wenigen Metern. Folglich haben sich die kognitiven und exekutiven Funktionen der Nervensysteme an Prozesse angepaßt, die für Interaktionen von Objekten dieser Größenordnung charakteristisch sind. Es ist das die Welt, in der die Gesetze der klassischen Physik gelten – weshalb wir diese und nicht jene der Quantenmechanik zuerst entdeckten. Es ist die Welt der soliden Gegenstände, der kausalen Wechselwirkungen, der nicht relativierbaren Koordinaten von Raum und Zeit, und es ist die Welt, in der vorwiegend lineare Modelle hinreichen, um den Großteil der für unser Überleben wichtigen Prozesse zu verstehen. Wir beobachten zwar Vorgänge, die eine andere Dynamik aufweisen und unseren Vorstellungen von Kausalität und Linearität zu widersprechen scheinen, aber wir haben Schwierigkeiten, die Gesetzmäßigkeiten intuitiv zu erfassen, die diesen Prozessen zu Grunde liegen. Dies gilt z. B. für alle Prozesse mit hoch nicht-linearer Dynamik, und hierzu gehören u. a. die Resonanzphänomene, die zu unerwarteten Verstärkungen von Schwingungen führen, das Aufschaukeln von extremen Wetterlagen und die scheinbar völlig unvoraussagbaren Phasenübergänge in chaotischen Systemen. Der Grund, warum wir Schwierigkeiten haben, uns die Gesetzmäßigkeiten vorzustellen, die solche Prozesse hervorbringen, der Grund, warum wir kein rechtes Gefühl für solche nicht-linearen Wechselwirkungen haben, ist vermutlich, daß uns die Ausbildung dieses Vorstellungsvermögens nicht viel weiter gebracht hätte. Modelle von Vorgängen und deren Gesetzmäßigkeiten zu erstellen, ist für Organismen nur dann von Vorteil, wenn sich aus diesen zutreffende Vorausagen ableiten lassen. Für die Entwicklungsdynamik hoch nicht-linearer Systeme ist diese Bedingung nicht erfüllt. Selbst bei Kenntnis der herrschenden Ausgangsbedingungen ist es meist unmöglich vorauszusagen, wie sich das System in Zukunft weiter entwickeln wird. Es bringt also kaum Vorteile, sich mit der Analyse der Interaktionsdynamik hoch

nicht-linearer Systeme zu befassen, wenn es darum geht, Modelle von der Welt zu erstellen, von denen zutreffende Voraussagen abgeleitet werden können. Es gab also vermutlich keinen Selektionsdruck für die Ausbildung kognitiver Funktionen zur Erfassung nicht-linearer dynamischer Prozesse – und dies könnte der Grund dafür sein, warum es uns so schwer fällt, uns solche Prozesse vorzustellen. Den gleichen Grund könnte unser Unvermögen haben, die Vorgänge in der Quantenwelt intuitiv zu erfassen. Diese Prozesse spielen beim Entwurf von Überlebensstrategien keine Rolle. Wir haben vermutlich deshalb für deren Wahrnehmung keine Sinnessysteme entwickelt. Unsere Nervensysteme haben sich vielmehr darauf spezialisiert, einige der in unserer makroskopischen Lebenswelt relevanten Signale aufzunehmen und diese auf Gesetzmäßigkeiten hin zu untersuchen, die es erlauben, Voraussagen zu machen.

Diese Beschränkung unserer kognitiven Fähigkeiten könnte eine Erklärung dafür sein, warum unsere Intuition Vorstellungen über die Organisation unseres Gehirns entwickelt hat, die mit der naturwissenschaftlichen Beschreibung dieses Organs nicht übereinstimmen. Das menschliche Gehirn ist fraglos das komplexeste System in dem uns bekannten Universum, wobei komplex nicht einfach für kompliziert steht, sondern im Sinne der Komplexitätstheorie als terminus technicus spezifische Eigenschaften eines Systems benennt, das aus sehr vielen aktiven, miteinander auf besondere Weise interagierenden Einzелеlementen besteht. Solche Systeme zeichnen sich durch eine hoch nicht-lineare Dynamik aus und sind deshalb in der Lage, Qualitäten hervorzubringen, die aus den Eigenschaften der Komponenten nicht ableitbar sind. Sie können nahezu unendlich viele Zustände in hochdimensionalen Räumen einnehmen und dabei neue, prinzipiell unvorhersehbare Muster ausbilden. Sie vermögen dies, weil sie in der Lage sind, sich selbst zu organisieren und ohne den koordinierenden Einfluß einer übergeordneten Instanz hochgeordnete, metastabile Zustände einzunehmen. Somit sind sie hinsichtlich ihrer Entwicklungstrajektorien grundsätzlich offen. Sie sind kreativ.

Warum aber hat die Natur Gehirne mit diesen Eigenschaften ausgestattet, wenn es doch vornehmlich um die Analyse linearer Prozesse geht. Die Antwort auf die Frage muß unvollständig bleiben, weil wir die Organisationsprinzipien nur im Ansatz verstanden haben. Erkennbar ist jedoch bereits, daß die Versatilität komplexer, nicht-linearer Systeme genutzt werden kann, um Probleme der Informationsverarbeitung sehr

viel eleganter zu bewältigen als dies mit linearen Operationen möglich wäre, selbst wenn es sich bei diesen Problemen um die Analyse vorwiegend linearer Prozesse handelt. Beispiele sind die Mustererkennung, die Bildung von Kategorien, die assoziative Verknüpfung sehr großer Mengen von Variablen, das Treffen von Entscheidungen und die kreative Anpassung an sich ständig ändernde Bedingungen. Der geniale Trick scheint darin zu bestehen, die niedrig dimensionaligen Signale, die von den Sinnesorganen geliefert werden, in hochdimensionale Zustandsräume zu transponieren, dort zu verarbeiten und die Ergebnisse dann rückzutransformieren auf den niedrigdimensionalen Raum, in dem die Verhaltensreaktionen stattfinden. Offensichtlich haben wir aber keine Einsicht in die hochdimensionalen, nicht-linearen Prozesse, auf denen unsere kognitiven Leistungen beruhen, sondern nehmen nur die niedrig dimensionaligen Ergebnisse wahr. Und da wir kein Sensorium für die in unserem Gehirn ablaufenden Vorgänge haben, stellen wir uns offenbar vor, es müßten in ihm die gleichen linearen Vorgänge ablaufen, die wir den beobachtbaren Phänomenen in der Welt draußen unterstellen. Und dies ist vermutlich der Grund, warum wir glauben, daß es in unserem Gehirn eine zentrale Instanz geben müsse, einen autonomen Beweger, der über die Richtung zukünftiger Entwicklungstrajektorien entscheidet. Lineare Systeme können sich nicht selbst organisieren, sie sind nicht kreativ. Ihre Dynamik bewegt sich in unveränderlichen Zirkeln und wenn in ihnen Neues entstehen soll, dann müssen strukturierende Einflüsse von außen auf sie einwirken. Anders als selbstorganisierende Systeme bedürfen sie eines Bewegers. Weil wir Linearität annehmen, uns und unser Gegenüber aber als kreativ und intentional erleben, kommt unsere Intuition zu dem falschen Schluß, in unserem Gehirn müsse es eine übergeordnete, lenkende Instanz geben, welche die vielfältigen verteilten Prozesse koordiniert, Impulse für Neues gibt und den neuronalen Prozessen vorgängig über deren zukünftige Ausrichtung entscheidet. Und da wir diese virtuelle Instanz nicht zu fassen vermögen, schreiben wir ihr all die immateriellen Attribute zu, die wir mit dem Begriff des »Selbst« verbinden: Die Fähigkeit, initiativ zu sein, zu wollen, zu entscheiden und Neues zu erfinden.

Diese Begrenzung unseres Vorstellungsvermögens erklärt vielleicht, warum unsere Intuition über die Vorgänge in unserem Gehirn nicht mit dem übereinstimmt, was die Hirnforschung über diese in Erfahrung gebracht hat. Die Einsicht in diese Begrenzung mag uns auch Warnung sein, die aus unserer Intuition abgeleiteten Vorstellungen von uns und

der uns umgebenden Welt nicht zur alleinigen Grundlage zu machen für unser Urteilen und Handeln. Dies gilt vor allem dann, wenn wir absichtlich oder gezwungenermaßen in die Dynamik komplexer Systeme der Außenwelt eingreifen. Hierzu zählen sämtliche Systeme unserer Lebenswelt, die aus einer Vielzahl miteinander wechselwirkender aktiver Komponenten bestehen, also soziale und politische Systeme ebenso wie Wirtschaftssysteme und Biotope. All diese Systeme weisen eine hoch nicht-lineare Dynamik auf: Sie organisieren sich selbst, erzeugen fortwährend neue Muster, sind hinsichtlich ihrer zukünftigen Entwicklung nicht festgelegt und warten deshalb mit Überraschungen auf, die nicht prognostizierbar sind.

Als Handelnde sind wir aktive Komponenten solcher Systeme und befördern durch unser Tun deren Dynamik und zukünftige Entwicklung. Und das konfrontiert uns mit einem doppelten Problem.

Auch unserem Handeln in komplexen lebensweltlichen Systemen scheinen wir vorwiegend lineare Modelle zu Grunde zu legen, weil uns die Intuition für deren nicht-lineares Verhalten fehlt. Wir neigen deshalb dazu, das Selbstorganisationsvermögen dieser Systeme zu unterschätzen und deren Lenkbarkeit zu überschätzen. Wir gehen auch hier davon aus, daß die effektivste Strategie zur Stabilisierung und Steuerung dieser Systeme darin besteht, zentrale Instanzen zu etablieren, welche die vielen verteilten Prozesse regulieren und die Entwicklung des Gesamtsystems in die gewünschte Richtung lenken. Ein Blick auf die hierarchischen Strukturen in unseren Gesellschafts- und Wirtschaftssystemen genügt, um zu erkennen, daß wir diese Intuition auch umsetzen. Dabei stellt sich die Frage, ob unser Vertrauen in die Fähigkeiten dieser Instanzen immer gerechtfertigt ist und ob wir sie nicht gelegentlich überfordern, weil wir von ihnen mehr erwarten als sie selbst unter optimalen Bedingungen leisten können. Aus prinzipiellen Gründen sind die Entwicklungstrajektorien komplexer Systeme offen und schwer prognostizierbar und das selbst dann, wenn die Ausgangsbedingungen vollständig bekannt sind – was natürlich in unseren lebensweltlichen Systemen nie der Fall sein wird.

Aus den gleichen Gründen ist nur schwer vorhersehbar, wie sich steuernde Eingriffe auf das Verhalten solcher komplexer Systeme auswirken werden. Meist wird sich erst im Nachhinein und nach längerer Zeit erweisen, welche Konsequenzen eine dirigistische Maßnahme tatsächlich hatte. Und es wäre verfehlt, den Vorwurf des Irrtums zu erheben, wenn es anders kommt als intendiert, weil die Prämisse der Voraus-

sagbarkeit von Konsequenzen nur sehr eingeschränkt gilt. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, jeweils genau zu prüfen, inwieweit die institutionalisierten Steuerungsmechanismen der Dynamik des zu steuernden Systems entsprechen. Handelt es sich um wenig komplexe Systeme mit vorwiegend linearer Dynamik, dann sind hierarchisch strukturierte, dirigistische Lenkungsstrukturen eine gute Option. Handelt es sich jedoch um hochkomplexe Systeme mit stark nicht-linearem Verhalten, dann ist es vermutlich opportuner, auf die Selbstorganisationskräfte und die Kreativität solcher Systeme zu vertrauen als der Illusion zu erliegen, man könne diese lenken. Eingriffe müßten sich dann darauf beschränken, die Interaktionsgeflechte und Informationsflüsse so zu gestalten, daß sich die selbstorganisierenden Mechanismen optimal entfalten können. Da wir, wie ausgeführt, geneigt sind, die Vorgänge in der Welt intuitiv in linearen Modellen abzubilden, darf vermutet werden, daß wir mehr zu dirigistischen Maßnahmen tendieren als es erforderlich und zweckdienlich ist.

Daß sich unsere lebensweltlichen Systeme aber überhaupt soweit entwickeln konnten und dabei leidlich stabil blieben, sollte für sich genommen schon als gute Nachricht gewertet werden und uns ermutigen, der Robustheit dieser durch Selbstorganisation entstandenen Strukturen mehr Vertrauen entgegenzubringen. Kein noch so umsichtiger Planer wäre je fähig gewesen, komplexe Systeme, wie unser Gehirn oder unsere sozialen und wirtschaftlichen Gefüge ab initio zu entwerfen und so zu konzipieren, daß sie funktionieren und über längere Zeiträume stabil bleiben.

Semiconductors with Brain

Wir betrachten das direkte elektrische Interfacing von Halbleiterchips mit individuellen Nervenzellen und mit Hirngewebe. Zunächst wird die Struktur des Kontakts von Zellen und Chips studiert und danach die elektrische Kopplung von Ionenkanälen – den elektrischen Elementen der Nervenzellen – mit Transistoren und Kondensatoren in Siliziumchips charakterisiert. Auf dieser Basis gelingt die Signalübertragung zwischen der Mikroelektronik und der Mikroionik von Nervenzellen in beide Richtungen. Einfache hybride neuroelektronische Systeme werden mit Neuronpaaren und kleinen neuronalen Netzen aufgebaut. Schließlich wird das Interfacing mit Kondensatoren und Transistoren auf Hirngewebe übertragen, das auf Siliziumchips kultiviert ist. Die Anwendung von CMOS-Chips erlaubt die Abbildung neuronaler Aktivität mit hoher raumzeitlicher Auflösung. Ziel der Arbeit ist die Integration von neuronaler Netzwerkdynamik und digitaler Elektronik auf mikroskopischer Ebene im Hinblick auf Experimente in der Hirnforschung, der Biosensorik, der medizinischen Prothetik und der Informationstechnologie.

1 Introduction

Both, computers and brains work electrically. However, their charge carriers are different – electrons in solid silicon and ions in liquid water. It is an intellectual and technological challenge to join these different systems directly on the level of electronic and ionic signals as sketched in the cartoon of Fig. 1a. Already in the 18th century, Luigi Galvani established the electrical coupling of inorganic solids and excitable living tissue. Today, after fifty years of dramatic developments in semiconductor microtechnology and cellular neurobiology, we may envisage a multisite integration of microionics and microelectronics with numerous nerve cells and microelectronic devices as indicated in Fig. 1b.

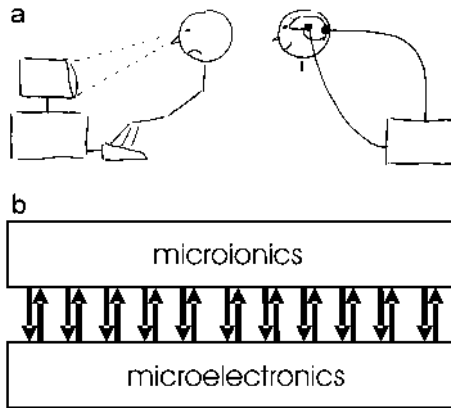


Figure 1: Neuroelectronic interfacing. (a) Brain-computer interfacing through the macroscopic optical and mechanical pathways screen-eye and finger-keyboard, and hypothetical microscopic interfacing of a computer with the visual and motor cortex. (b) Scheme of interfacing between microionics and microelectronics.

Usually, the coupling of electronic signals and ionic signals in neurons is achieved with perfectly unpolarized solid/water contacts such as Ag/AgCl electrodes where ionic and electronic currents are transformed by an electrochemical reaction as illustrated in Fig. 2a. That approach is not well suited for iono-electronic interfacing on a microscopic scale with thousands of contact sites. Semiconductor chips must be shielded from corrosion in water. Efficient interfacing has to be implemented with polarized solid/water contacts without ionic or electronic current as illustrated in Fig. 2b. The communication between microionics and microelectronics is achieved by displacement currents across the insulating oxide.

In the present paper, we consider step by step the physicochemical mechanism of bioelectronic interfacing on the scale of nanometers, micrometers and millimeters. We start with the contact between an individual nerve cell and a silicon chip. Then we study the interfacing of the fundamental devices of the brain – ion channels – and fundamental devices of computers – capacitors and transistors. On that basis, we consider the interfacing of nerve cells with capacitors and transistors and the assembly of simple bioelectronic hybrids with two nerve cells and

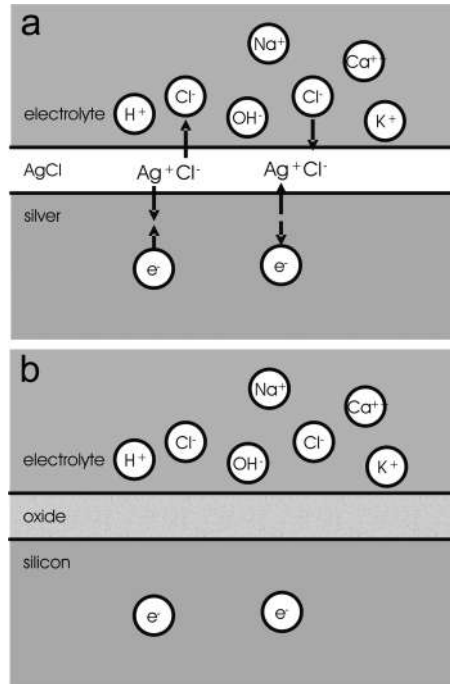


Figure 2: Iono-electronic interfacing. (a) Perfectly unpolarized Ag/AgCl electrode with Faradayic current across the interface of electronics and ionics. (b) Perfectly polarized electrolyte/oxide/silicon electrode without Faradayic current. The interaction of electronics and ionics is achieved by displacement current across the oxide.

simple neuronal networks. Finally, we address problems with respect to the electronic interfacing of brain tissue.

2 Cell-Chip Contact

A simple hybrid with a nerve cell from rat brain and a transistor in silicon is depicted in Fig. 3. A schematic cross section of the cell-chip contact is drawn in Fig. 4. The cell is surrounded by a membrane with an electrically insulating core of lipid. That lipid bilayer (thickness

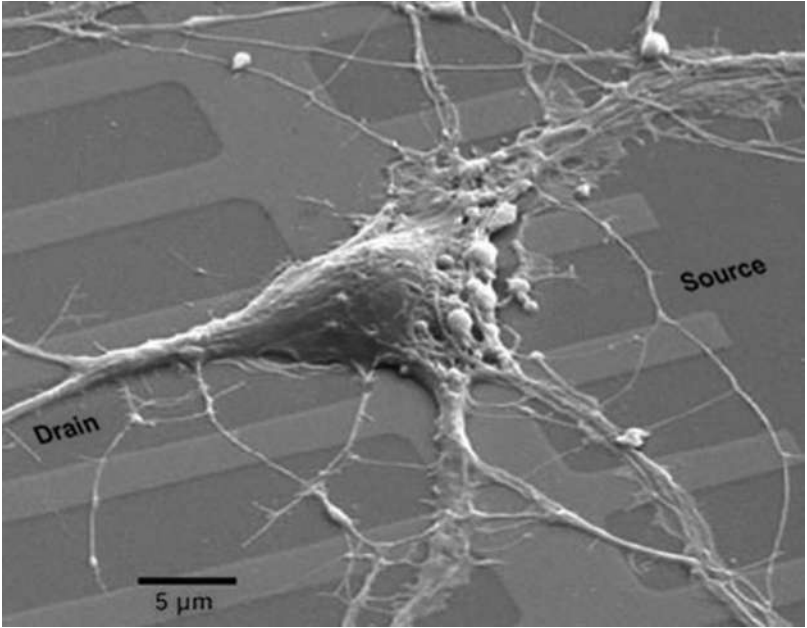


Figure 3: Nerve cell from rat brain on silicon chip. Electronmicrograph. The surface of the chip consists of thermally grown silicon dioxide. The metall-free gates of a linear array of low-noise field-effect transistors are visible as bright squares between the dark blue regions of sources and drains. The neuron is cultured for several days in electrolyte.

about 5 nm) separates the bath with 150 mM (10^{20} cm^{-3}) sodium chloride from the cytoplasm with about 150 mM potassium chloride. The silicon is coated with thermally grown silicon dioxide (thickness 10 nm) that suppresses electrochemical processes that lead to a corrosion of silicon and to a damage of the cells.

The basic problem with respect to an electrical interaction of cell and chip is the structure of the contact between lipid bilayer and oxide. The crucial questions are: (i) What is the distance? (ii) What is the electrical resistance? They are answered by optical experiments.

Distance. Silicon reflects light such that standing modes of the electromagnetic field are formed in front of its surface. We take advantage of that effect to measure the distance of cells and silicon using fluorescent dye molecules as antennas. We fabricate silicon chips with microscopic

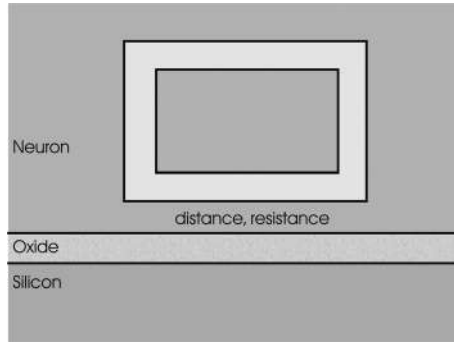


Figure 4: Schematic cross section of cell-silicon contact. The insulating part of the cell membrane (lipid bilayer) is separated from the insulating oxide of the silicon chip by a thin layer of electrolyte. The distance between cell and chip and the electrical sheet resistance are measured by optical methods (fluorescence interference contrast microscopy, Stark-phase microscopy).

oxide terraces (size $2.5\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$, step high about 20 nm), culture cells and label the lipid bilayer with a fluorescent dye. The terraces of defined height together with the unknown distance between chip and cell bring the membrane into different positions in the standing modes. As a consequence, the absorption and the emission of light by the dye are modulated. A fluorescence micrograph of an astrocyte from rat brain on a silicon chip is shown in Fig. 5a.

The checkerboard pattern is caused by the oxide terraces of different height beneath the cell. When we evaluate the intensities with an electromagnetic theory, we find that there is a cleft between the oxide and the lipid bilayer. Results for HEK293 cells on chips coated with fibronectin are plotted in Figs. 6a and 6b. The distance is around 70 nm, independent on the electrical resistivity of the bath. That separation is caused by proteins in the membrane (glycocalix) and on the chip (fibronectin). It is an interesting task to reduce that distance by physical and chemical modifications of the chip and by genetical modifications of the membrane, without impairing the viability of the cells.

Resistance. The electrical coupling of chip and cell depends on the electrical resistance of the 70 nm thin layer between the oxide and the lipid bilayer. To measure that resistance, we apply an alternating voltage to the chip. The resistance and the capacitances of oxide and mem-

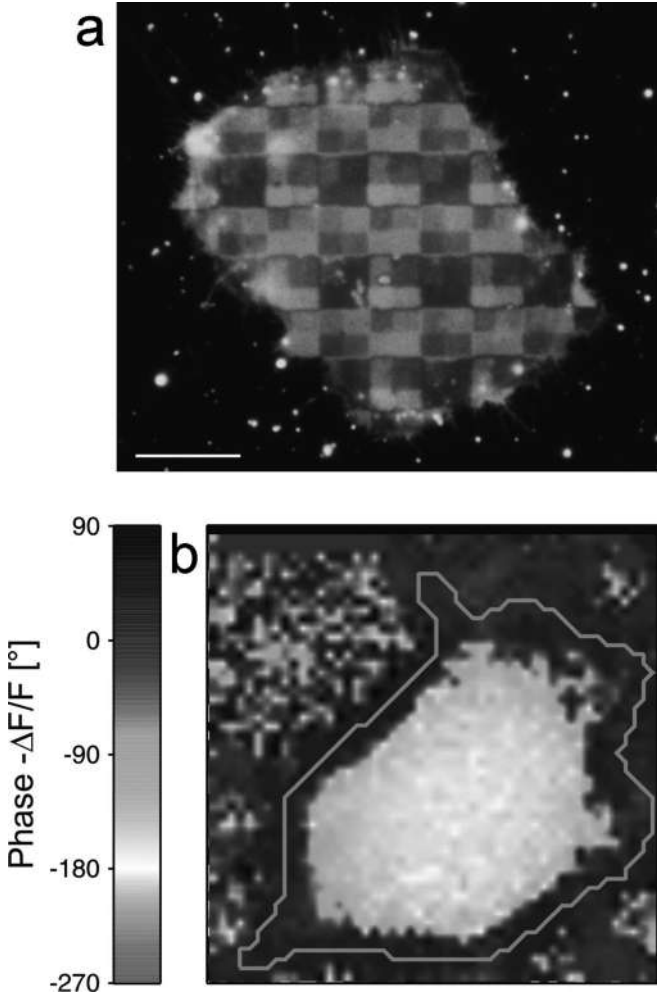


Figure 5: Optical probing of cell-chip contact. (a) Fluorescence interference contrast (FLIC) microcopy. Scale bar 10 μm . A cell is cultured on a silicon chip with quadratic terraces of silicon dioxide. The membrane is stained with a fluorescent dye. Due to light reflection by silicon, the fluorescence intensity depends on the height of the terraces. The distance of membrane and chip is obtained from the fluorescence pattern. (b) Stark-phase microscopy. A cell is cultured on an electrolyte/oxide/silicon capacitor. An alternate voltage of 50 kHz is applied that induces the Stark effect of a fluorescent dye in the membrane. The picture shows the phase shift of the relative fluorescence intensity. The electrical resistance between chip and cell is obtained from the Stark-phase map.

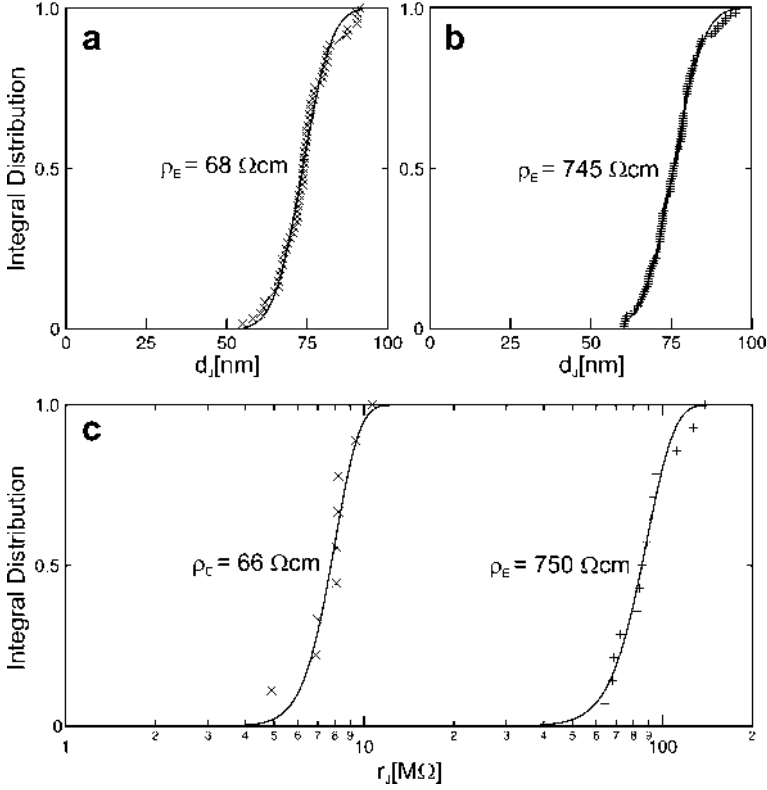


Figure 6: Distance between silicon chip coated with fibronectin and HEK293 cells that are cultured with serum. (a) and (b) Integral distribution of the distance in two bath electrolytes with different resistivity. (c) Integral distribution function of the sheet resistance in two bath electrolytes with different resistivity.

brane determine the voltage across the attached membrane. We detect the phase shift of the alternating voltage by a fluorescent dye with a molecular Stark effect, i.e., with a sensitivity of light absorption and light emission to the electrical field across the membrane. A phase map of the relative change of fluorescence intensity at a frequency of 50 kHz is shown in Fig. 5b for a HEK293 cell on fibronectin.

Within the area of cell adhesion, the phase is rather smooth between -90°C and -180°C . When we evaluate the phase map in terms of an electrical model, we can determine the electrical resistance of

the layer between chip and cell – given the capacitances of oxide and membrane. Results for two different bath electrolytes are depicted in Fig. 6c. In normal culture medium, the sheet resistance is around 10 M Ω . When we enhance the resistivity of the bath, the sheet resistance is proportionally enhanced.

When we combine the results of the resistance measurement and of the distance measurement, we find that the 70 nm cleft between cell and chip is filled with electrolyte from the surrounding bath. That conductive sheet between oxide and membrane prevents an effective interaction of chip and cell by direct electrical polarization. We must find a different coupling mechanism between ionics and electronics.

3 Ion-Electron Coupling

The electrical elements of nerve cells are voltage-gated ion channels. These molecules are embedded in the lipid bilayer of the membrane. They can be in an open and in a closed state as indicated in Fig. 7. When they are open, they selectively transmit ionic current through the membrane – Na⁺ inward current or K⁺ outward current. The opening and closing of the channels is connected with a displacement of electrical charge across the membrane as marked in Fig. 7. As a consequence, opening and closing is controlled by the voltage across the membrane. The electrical communication between semiconductors and cells relies on an interaction of the ion channels with the chip. Two devices are used in silicon chips, an electrolyte/oxide/silicon capacitor for activation of ion channels (Fig. 7a) and an electrolyte/oxide/silicon field-effect transistor for detecting open channels (Fig. 7b). The interaction of channels and chips is determined by the electrical nature of the contact – the insulating oxide, the insulating lipid bilayer and the thin layer of electrolyte.

Ion channels and capacitors. We test the electrical signalling from chip to cell with HEK293 cells that are transfected with the gene of the potassium channel Kv1.3. The cells are cultured on an electrolyte/oxide/silicon capacitor. A falling voltage ramp is applied to the capacitor. A displacement current flows across the oxide and leads to an ohmic current along the resistance of the cell-chip contact as indicated

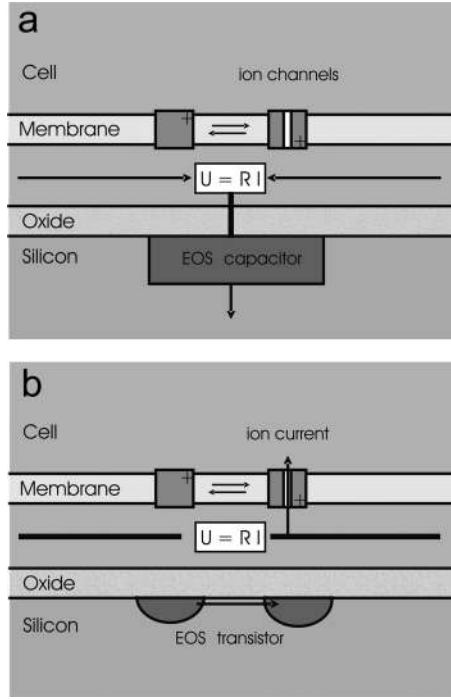


Figure 7: Iono-electronic interfacing. (a) Activation of voltage-gated ion channels by electrolyte/oxide/silicon capacitor. A falling voltage ramp is applied to the chip with a displacement current across the oxide and a concomitant current along the cell-chip contact. The resulting negative extracellular voltage opens the channels. (b) Recording of ion channels with electrolyte/oxide/silicon field-effect transistor. Inward ion current through open channels gives rise to a negative extracellular voltage that modulates the electronic current in a field-effect transistor.

in Fig. 7a. The resulting negative extracellular voltage opens the channels in the attached membrane. To achieve a sufficient displacement current and a sufficient extracellular voltage, we isolate the chip with a thin layer of titanium dioxide that has a high dielectric constant and we use a bath electrolyte with an enhanced electrical resistivity. We measure the ion current through the membrane with a micropipette that is fused to the cell. The experiment is performed at a constant intracellular voltage such that the channels are closed without capacitive stimulation. The result of an experiment is shown in Fig. 8.

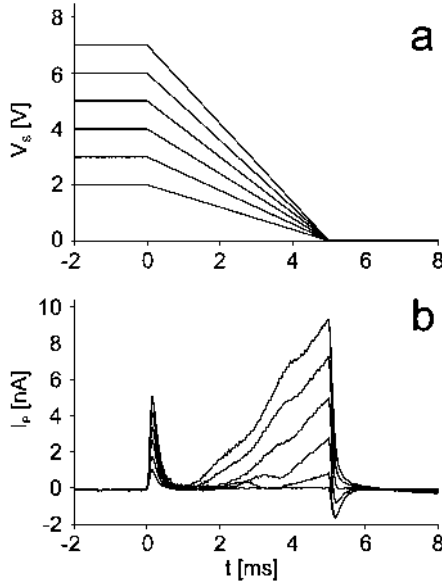


Figure 8: Capacitive activation of potassium channels. HEK293 cells with recombinant Kv1.3 channels are cultured on a electrolyte/TiO₂/silicon capacitor. The intracellular voltage is kept constant with a patch pipette. (a) Falling voltage ramps are applied to the chip. (b) The membrane current increases during the ramps due to potassium channels in cell-chip contact.

When falling voltage ramps are applied to the capacitor, the current through the membrane is enhanced, depending on the slope of the ramp. That current signal is specific for the Kv1.3 channels as is proven by the application of margatoxin that selectively blocks these channels. The experiment shows that we are able to control the ionic current in the cell by an electronic signal in the semiconductor with a current-voltage-current mechanism: The displacement current across the oxide is transformed to an extracellular voltage between oxide and membrane that induces an ion current through the membrane.

Ion Channels and transistors. We test the signalling from cell to chip with HEK293 cells that are transfected with the gene of the sodium channel Nav1.4. The cells are cultured on a chip with electrolyte/oxide/silicon field-effect transistors. Using a micropipette, positive voltage pulses are applied that open the channels in the attached membrane.

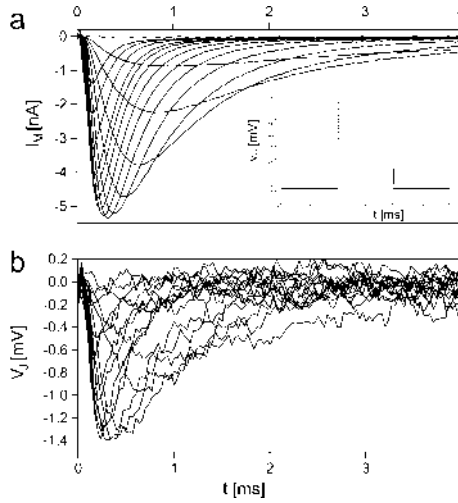


Figure 9: Transistor record of recombinant Nav1.4 channels in HEK293 cells. Voltage steps are applied to the cell with a micropipette (insert). (a) Transient membrane currents indicate open sodium channels. (b) The extracellular voltage on the transistor responds with transients that are proportional to the membrane current.

Na^+ current flows into the cell and along the resistance of the thin layer of electrolyte as indicated in Fig. 7b. It gives rise to a negative extracellular voltage that modulates the electron current in silicon from source to drain. We simultaneously record the transistor signal as well as the total membrane current using the micropipette. The result of an experiment is shown in Fig. 9.

When positive voltages are applied to the cell, a transient inward current is observed through the membrane as expected for Na^+ channels. Simultaneously, a transient transistor signal appears. A quantitative evaluation shows that the transistor voltage is proportional to the membrane current as controlled by the resistance of the cell-chip contact. The experiment shows that we are able to control the electronic current in the semiconductor by an ionic signal in the cell again by a current-voltage-current mechanism: The ionic current through the membrane is transformed to an extracellular voltage between oxide and membrane that controls the electron current in the semiconductor.

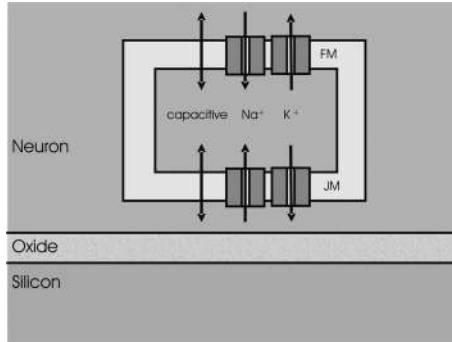


Figure 10: Scheme of intact nerve cell on silicon chip. Current through various kinds of ion channels as well as capacitive current must be considered. For capacitor stimulation as well as for transistor recording, not only the attached membrane plays a role, but also the upper membrane that is electrically coupled through the intracellular space.

4 Nerve Cell on Semiconductor

The first step towards an integration of neuronal dynamics and digital electronics is an interfacing of individual nerve cells and silicon microstructures. We consider the excitation of nerve cells by capacitors and the recording of neuronal activity by transistors. A crucial issue with respect to capacitor stimulation and transistor recording is the contribution of the cell membrane that is attached to the chip as well as of the upper free membrane that is in contact to the bath as illustrated in Fig. 10.

When a rising or falling voltage ramp is applied to a capacitor, the extracellular voltage between chip and cell polarizes the attached membrane as well as the upper membrane. Ion channels may be affected in both domains. Of course, the induced voltages across attached and free membrane have an opposite direction. On the other hand, when a nerve cell is excited, ion currents through the attached as well as through the upper free membrane lead to a changing intracellular voltage change. The total current through the attached membrane with an ionic and a capacitive component gives rise to a voltage on the transistor. The capacitive part results from the changing intracellular voltage and depends on the ionic current through the upper free membrane.

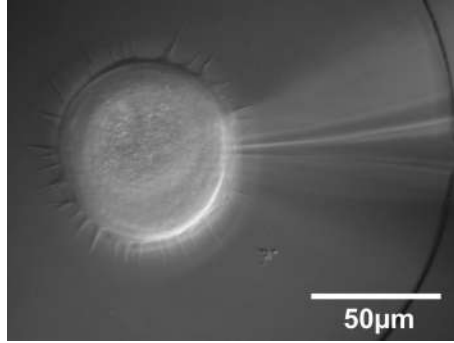


Figure 11: Stimulation experiment with an individual nerve cell from the pond snail on an electrolyte/oxide/silicon capacitor. A circular area of the chip is insulated by a thin layer of HfO_2 . A micropipette is used to record the response of the cell to capacitive stimulation.

Capacitor stimulation. We dissociate individual nerve cells from the ganglia of pond snails and attach them to an electrolyte/oxide/silicon capacitor as shown in Fig. 11. Rising as well as falling voltage ramps are applied to the capacitor. The intracellular voltage is recorded with an impaled micropipette. The results are depicted in Fig. 12.

A rising voltage ramp leads to a displacement current into the chip-cell junction and a positive extracellular voltage between chip and cell. There are voltage drops across the attached and upper membrane such that the attached membrane is hyperpolarized and the upper free membrane is depolarized. Ion channels are activated in the upper membrane and an action potential is elicited there when the voltage ramp is above a certain threshold as shown in Fig. 12a. A rather high slope of the ramp is required because most of the extracellular voltage between chip and cell drops across the attached membrane with its small area and its small capacitance.

A falling voltage ramp leads to a negative extracellular voltage between chip and cell. In that case the attached membrane is depolarized. In a first step, ion channels are activated there, and in a second step the resulting inward Na^+ current depolarizes the whole cell membrane such that an action potential is elicited as shown in Fig. 12b. The effect disappears for strong stimulation when an outward K^+ current is activated that suppresses the depolarization of the cell.

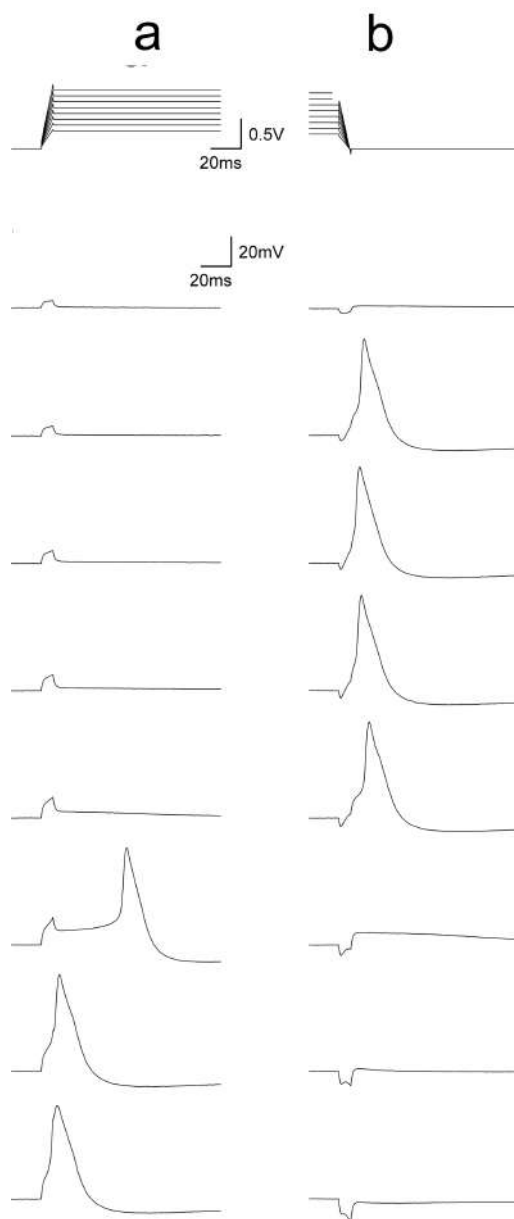


Figure 12: Capacitive stimulation of snail neuron. (a) Rising voltage ramps (top) and intracellular voltages. (b) Falling voltage ramps (top) and intracellular voltages.

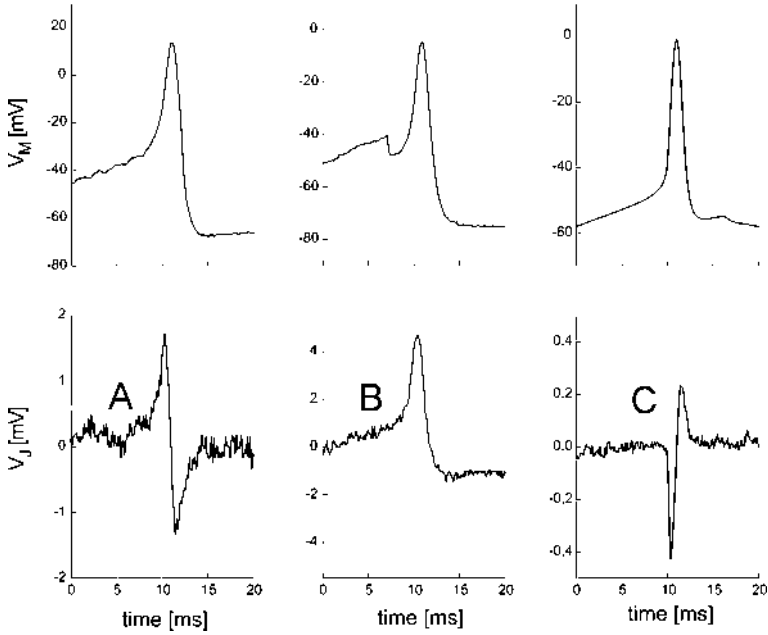


Figure 13: Transistor records of the excited leech neurons. The upper row shows the intracellular voltage, the lower row extracellular voltage measured with a transistor. A-type coupling is dominated by capacitive current across the attached membrane, B-type coupling by ohmic current and C-type coupling by sodium and potassium currents.

Transistor recording. Dissociated nerve cells from the leech ganglia are placed on the open gates of electrolyte-oxide-silicon field-effect transistors. They are impaled with a micropipette electrode for stimulation and for recording of the intracellular voltage. Calibrated transistors detect the transient extracellular voltage between cell and chip. Three records are shown in Fig. 13.

In the first record, the extracellular voltage resembles the first derivative of the intracellular voltage. In the second record, the extracellular voltage resembles the waveform of the intracellular voltage. In the third example, the transistor signal shows a peak in the rising phase of the intracellular voltage and a trough in its falling phase. The different signals reflect a different contribution of ionic currents and of capacitive current through the attached cell membrane. The A-type signal is determined by the capacitive current that results from the dynamics of

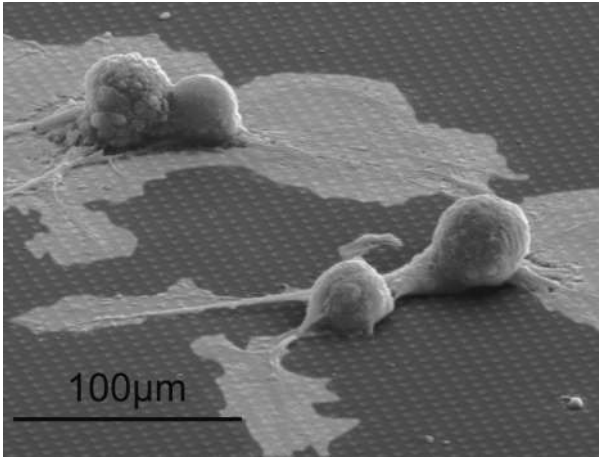


Figure 14: Nerve cells from pond snail on the multitransistor array of a CMOS chip. Electronmicrograph. The surface of the chip consists of a thin layer of TiO_2 . The contacts of the recording transistors (16 384 on 1 mm^2) shine through the surface. The transistor array allows a mapping of extracellular voltage beneath individual nerve cells with a resolution of $8 \mu\text{m}$.

intracellular voltage as determined by the ionic currents of the upper free membrane. The B-type signal is due to ohmic leak current that is driven by the intracellular voltage. The C-type record indicates a dominance of ionic currents with a sharp Na^+ inward current and a delayed K^+ outward current.

The different types of neuronal recordings may be attributed to an inhomogeneous distribution of the ionic conductances in the attached and free part of the cell membrane and to different positions of the nerve cell on the transistor. That hypothesis can be tested when neuronal excitation is not probed with a single transistor, but with a closely packed array of transistors. Such an array is fabricated by CMOS technology. Figure 14 shows cultured snail neurons on the surface of a CMOS chip with 16 384 sensor transistors on one squaremillimeter. When a selected nerve cell is excited with a micropipette, a set of transistors beneath the cell is able to map the extracellular voltages in the cell-chip contact. These experiments are able to demonstrate that different kinds of signals, such as shown in Fig. 13, appear at different positions of the same nerve cell. The interfacing of cell and chip depends on structural details of the attached cell.

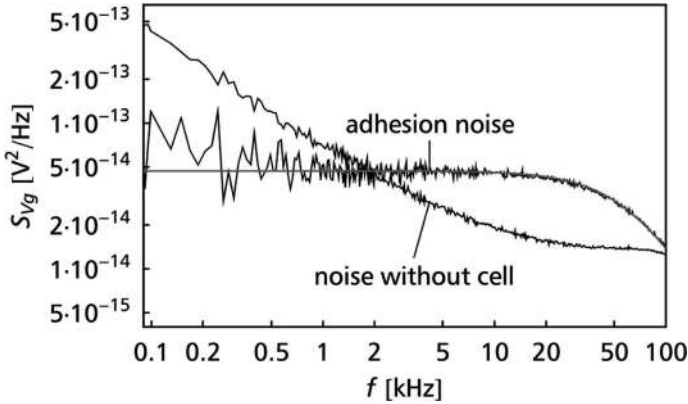


Figure 15: Noise of cell-chip contact. Power spectrum of voltage noise for an electrolyte/oxide/silicon field-effect transistor without cell and for the adhesion of a rat neuron as obtained from transistor measurement. The noise of adhesion overcomes the noise of the transistor above 2 kHz.

Noise. We observe that the amplitude of transistor records for nerve cells from leeches and snails is far larger than for nerve cells from rats. The reason is not a different biophysical mechanism of coupling but a different size of cell: The current through the attached membrane is proportional to the size of the cell whereas the effective resistance of the contact scales logarithmically with the contact area. As a consequence, the extracellular signals of small mammalian neurons are in the range of 100 μ V. They can be detected only with transistors that have a particularly low noise.

It is important to note, however, that there exists a thermodynamic limit with respect to the reduction of noise in extracellular recording. The overall noise of transistor recording is due to intrinsic noise and to thermal noise that arises from the electrical resistance of the cell-chip contact. An example is shown in Fig. 15. The intrinsic noise of the transistor follows a $1/f$ relation at low frequencies. The noise of cell adhesion is constant up to high frequencies and overcomes the transistor noise above 2 kHz. An improvement of the transistor is not meaningful for measurements at high frequencies where the noise of cell adhesion dominates.

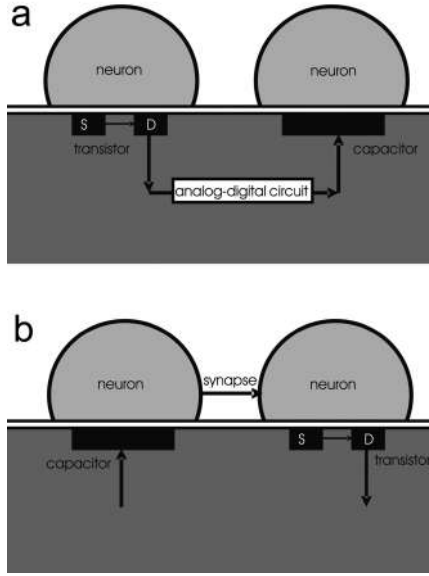


Figure 16: Elementary hybrid neuroelectronic devices. (a) Cellular neuroprosthetics. An input neuron is probed by a transistor. The signals are converted on the chip and applied to a capacitor that stimulates an output neuron. (b) Neuronal memory on chip. An input neuron is stimulated from the chip and coupled by a synapse to an output neuron. The synaptic strength is potentiated by capacitive stimulation.

5 Elementary Neuroelectronic Hybrids

In a first step to assemble neuroelectronic hybrids, we couple pairs of nerve cells to a chip with two different pathways as illustrated in Fig. 16. (i) A cellular neuroprosthesis is implemented by a signalling »neuron-silicon-silicon-neuron« where the activity of a neuron is recorded with a transistor and where the signal is processed on the chip and used for capacitor stimulation of a second neuron. (ii) A neuronal memory element is obtained with a signalling »silicon-neuron-neuron-silicon« where a capacitively stimulated neuron couples to a second neuron through a chemical synapse and where the postsynaptic response is detected with a transistor.

Cellular neuroprosthesis. A hybrid system with the pathway neuron-silicon-silicon-neuron is depicted in Fig. 17a. Two snail neurons are attached to a silicon chip with two-way contacts that consist of a transistor and a capacitor. The two nerve cells have no direct contact to each other. The overall function of the hybrid is as follows: The spontaneous activity of the first neuron is recorded by a transistor. The transistor record of an action potential is identified on the chip. A digital signal triggers a delay line and a burst of voltage pulses that is applied to a capacitor. Neuronal activity in a second neuron is elicited by capacitive coupling. As a result, the second neuron fires in strict correlation to the first neuron without neuronal connection. A crucial problem is crosstalk from capacitor to transistor on the chip such that artifacts of the transistor record must be eliminated on the chip.

Neuronal memory on chip. A hybrid system with the pathway silicon-neuron-neuron-silicon is shown in Fig. 17b. Two identified snail neurons VD4 and LPeD1 are attached to an array of capacitors and transistors such that they form a soma-soma contact with a chemical synapse. The presynaptic nerve cell VD4 is stimulated from a capacitor, the signal activates the chemical synapse and the postsynaptic excitation of the LPeD1 cell is recorded with a transistor. It is important that the synaptic signal transfer can be induced by the chip: In a first test, there may be no postsynaptic activity if the synaptic coupling is weak. When we apply a series of capacitive presynaptic stimuli the synaptic strength is enhanced. A second test reveals a postsynaptic action potential that is recorded by the transistor. Thus, the two-neuron hybrid implements a neuronal memory on chip.

6 Neuronal Networks on Chip

Complex neuronal networks rely (i) on a mapping between sets of neurons and (ii) on an enhanced synaptic strength by correlated presynaptic and postsynaptic activity (Hebbian learning). An experimental study of network dynamics requires (i) neuronal maps with a defined topology of the synaptic connections, and (ii) a noninvasive supervision of all neurons to induce learning and to observe the performance of the network. To achieve these goals we must control outgrowth and synapse

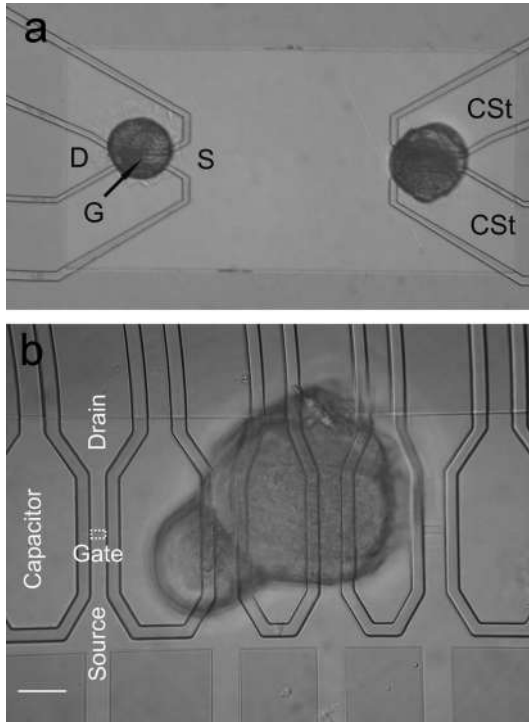


Figure 17: Implementation of elementary hybrid neuroelectronic devices. (a) Neuroprosthetic device with an input neuron (left) on a transistor with source (S), drain (D) and gate area (G) and with an output neuron (right) on the two wings of a capacitive stimulation area (CSt). Transistor and capacitor are connected by an electronic circuit on the chip. (b) Neuronal memory on chip with input neuron (small, left) on a capacitors and with an output neuron (large, right) on a transistor. The two neurons are coupled by a chemical synapse in their contact region. The strength of the synapse is potentiated by capacitive stimulation.

formation, and we must fabricate silicon chips with arrays of closely packed two-way contacts.

Immobilized neurons. Neuronal networks can be obtained in cell culture from nerve cells that are dissociated from the brain of snails and rats. During outgrowth, however, the cell bodies are displaced on the chip such that the junctions with transistors and capacitors are disrupted. To overcome that problem, picket fences of organic polymers

are fabricated on chip and the neuronal cell bodies are mounted as shown in Fig. 18a. The cell bodies are perfectly kept on the two-way contacts made of capacitors and transistors, even after culturing them for several days. A selected neuron is excited by a capacitor, a post-synaptic action potential is elicited through electrical synapses and the signal is recorded with a transistor.

Topographical guidance. It is well known that the outgrowth of neurons can be controlled by chemical patterns. However, that kind of guidance is not stable as strong mechanical forces tend to induce a shortening of neurites that grow in bends or around corners. Topographical guidance by grooves may overcome that problem. An example is shown in Fig. 18b. Using an organic polymer, wells and connecting grooves are fabricated on a chip with 16 two-way contacts of capacitors and transistors. After placing snail neurons into the wells, their outgrowth is guided by the grooves such that electrical synapses are formed. In principle, it is possible to create defined neuronal networks that are supervised from a chip. However, at present the yield of the overall assembly of the hybrids is too low to implement complicated systems.

Random nets on CMOS chips. The problem of displaced neurons is overcome when an array of closely packed capacitors and transistors is used, such that a displaced neuron finds itself on one or more two-contact sites, wherever it is on the chip. Of course, the defined control of network geometry is sacrificed in such systems. However, when the changing geometry is continuously monitored by the CMOS chip, we may perform experiment with complex patterns of stimulation that induce a spatially distributed neuronal memory on chip.

7 Brain Tissue on Chips

Culturing of defined neuronal networks is avoided when we use neuronal networks that are provided by brains. Brain tissue with a planar structure of the networks are required to attain an efficient interfacing with a planar chip. Organotypic brain slices are particularly promising because they are only a few cell layers thick and conserve major neuronal connections when properly cut. Compared to the culture of

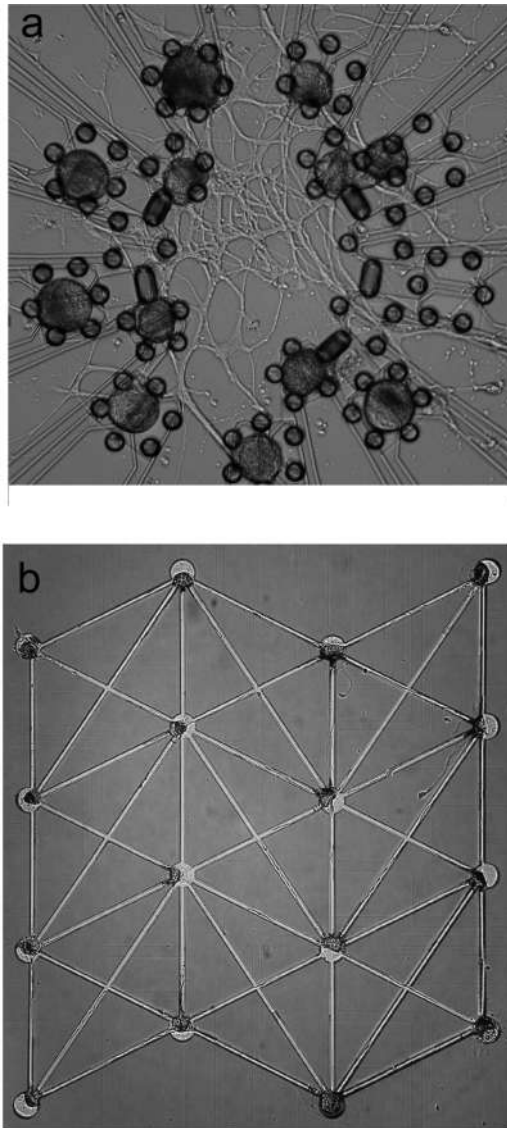


Figure 18: Neuronal networks on silicon chip. (a) Mechanical immobilization of cell bodies (dark blobs) by picket fences of an organic polymer (small dots) on capacitor/transistor contacts with neurites grown in the central area (bright threads). (b) Mechanical immobilization of the cell bodies by wells on 16 capacitor/transistor contacts and of grown neurites by guiding grooves in a organic polymer.

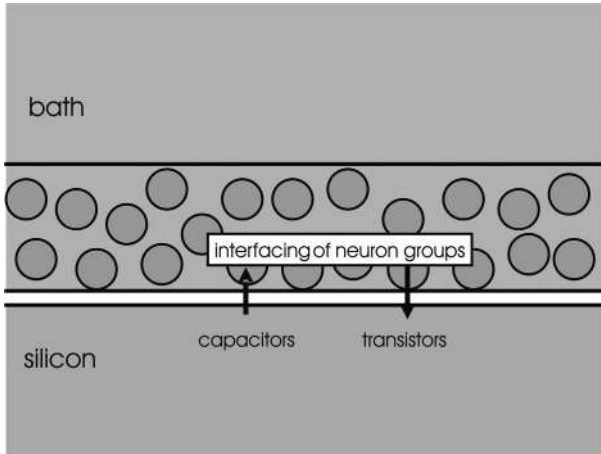


Figure 19: Schematic cross section of a layer of brain tissue (brain slice) on silicon chip. The microscopic structure the tissue with closely packed nerve cells on the chip is unknown. Interfacing with capacitors and transistors is achieved on the level of neuron groups.

dissociated cells, however, there are new problems when we want to interface individual nerve cells in a tissue as sketched in Fig. 19: (i) We cannot take it for granted that individual nerve cells are attached to capacitors and transistors with a distance of 70 nm. (ii) There are so many neuronal cell bodies embedded in glia cells and in a web of dendrites and axons, that we do not know which cell is coupled to a particular capacitor and transistor. It is an important task in the near future to investigate the structural and electrical features of the tissue-chip contact with the same optical methods that are used for cultured cells.

In a first approach, we attempt to achieve an electrical interfacing of organotypic brain slices on the level of neuronal groups, i.e., to stimulate a small area of presynaptic brain tissue with a capacitor and to detect the average postsynaptic activity in another small area of tissue with a transistor. Voltage ramps at a capacitor give rise to an extracellular voltage above the capacitor that is sufficient to elicit action potentials in a set of neurons. The coherent activity of several neurons activates nerve cells at a certain distance in the cultured slice where synchronous synaptic activity leads to an extracellular voltage that is recorded with a transistor.

Two-way interfacing. Figure 20a shows a classical picture of the wiring in a transverse section of rat hippocampus. We place a transverse slice on a chip with an array of large capacitors and an array of large transistors as shown in Fig. 20b. The capacitors are in the CA3 region whereas the transistors are in the CA1 region of the hippocampus. These two areas are connected by axons (Schaffer collateral). When the CA3 regions is stimulated, excitatory synapses in the CA1 regions are activated. A capacitor-neuron-neuron-transistor experiment is shown in Fig. 21.

Falling voltage steps of different height are applied to a capacitor in the region of cell bodies of CA3 (stratum pyramidale). With a certain delay, we observe negative extracellular voltages with a transistor in the dendritic region of CA1 (stratum radiatum). A postsynaptic signal appears only above a certain threshold of the capacitive stimulus. That threshold refers to the minimum extracellular voltage that is required to stimulate neurons above the center of the capacitor. An enhanced stimulus leads to an expansion of the area where the extracellular voltage is above threshold. More presynaptic neurons are excited and as a result, more postsynaptic neurons are activated such that the amplitude of the postsynaptic signal increases.

Mapping with CMOS chip. Interfacing of brain-tissue with cellular resolution requires not only a knowledge and control of the cell-chip contacts, but also a high density of capacitors and transistors. In a first approach, the mapping of postsynaptic activity is achieved on the level of neuronal groups using a CMOS chip with 16384 sensor transistors on one square millimeter.

Figure 22a shows a chip with an organotypic hippocampus slice where the transistor array covers the CA3 region. A tungsten micro-electrode is used to stimulate axons that enter the CA3 region (mossy fibers). Figure 22b shows the distribution of extracellular voltage 5 ms after stimulation. We see a negative signal in stratum radiatum (dendrites) and a positive signal in stratum pyramidale (cell bodies). The propagating action potential in the axons activate synapses in the dendritic region where current flows into the cells such that a negative extracellular voltage is created. Compensating outward current leads to positive voltage in the region of the cell bodies. The CMOS chip provides a time resolved map of activity with a resolution of 2 kHz that can be viewed as a movie.

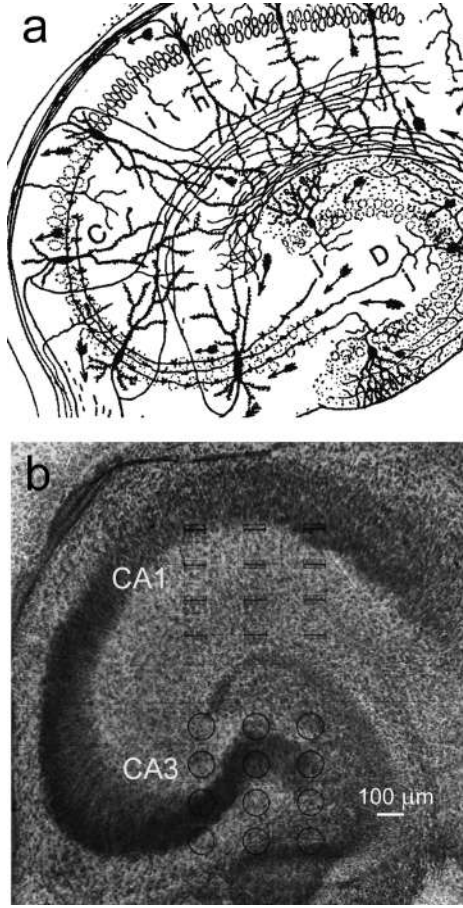


Figure 20: Rat hippocampus on silicon chip. (a) Transverse section of hippocampus that indicates the neuronal wiring (Golgi stain). (b) Hippocampus slice (Nissl stain) cultured on a chip with an array of large capacitors (circles) and an array of large transistors (rectangles).

The experiments with small arrays of large capacitors and large transistors as well as with the multitransistor array of a CMOS chip are first steps towards a complete interfacing of brain tissue on the level of individual neurons. Given the known features of hippocampus, we can envisage far reaching experiments on an associative neuronal memory integrated with a semiconductor chip.

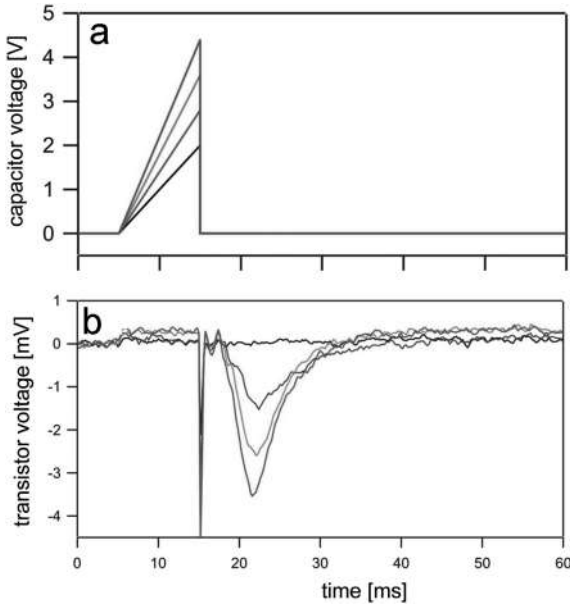


Figure 21: Capacitor stimulation and transistor recording of hippocampus slice. (a) Falling voltage steps are applied to a capacitor in the CA3 region. (b) Extracellular postsynaptic potentials are recorded by a transistor in the CA1 region.

8 Summary and Outlook

At present, basic problems on the electrical interfacing of individual nerve cells and semiconductor chips are solved – the structure of the cell-chip contact and the interfacing of transistors and capacitors with recombinant ion channels and with nerve cells. Important progress is due to the development of capacitors with high dielectric constant and of transistors with low noise. With respect to hybrid systems of neuronal networks and digital microelectronics, we are in an elementary stage. Two directions may be considered: (i) Small defined networks of neurons from invertebrates and mammals are created with defined topology and with learning synapses. (ii) Large neuronal nets are grown on closely packed arrays of two-way contacts fabricated by CMOS technology. With respect to the interfacing of brain slices, stimulation and recording is established on the level of neuronal groups and high

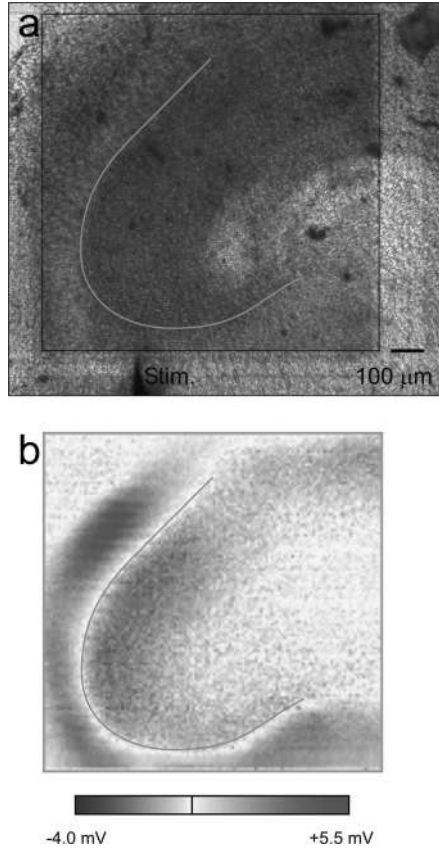


Figure 22: Functional mapping of brain slice by multitransistor array (MTA) recording. (a) Cultured hippocampus slice on CMOS chip. The square marks the area of the transistor array (16 384 sensor transistors on 1 mm²). The slice is stimulated by a tungsten electrode at the bottom (Stim). The gray line is redrawn from the activity map below. (b) Electrical field potential 5 ms after stimulation. The chip maps the activity of synapses in the area of inward current and of the compensating outward current.

resolution mapping is achieved with CMOS transistors. A development of large arrays of two-way contacts will allow to implement neuronal network dynamics – such as associative memory under digital control. Of course, visionary dreams of bioelectronic neurocomputers and microelectronic neuroprostheses are unavoidable and exciting. However, they should not obscure the numerous practical problems.

9 Literature

Reviews

1. P. Fromherz, Brain on Line? The Feasibility of a Neuron-Silicon Junction. In: *20th Winterseminar »Molecules, Memory and Information«*, Eds. E. Neumann and R. Winkler-Oswatitsch, Klostern 1985. (see: <http://www.biochem.mpg.de/mnphys>).
2. P. Fromherz, Interfacing Neurons and Silicon by Electrical Induction. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 100 (1996) 1093-1102.
3. P. Fromherz, The Neuron-Semiconductor Interface. In: *Bioelectronics*. Eds. I. Willner & E. Katz (Wiley-VCH, Weinheim 2005) pp. 339-394.

Cell-Chip Contact

1. A. Lambacher, P. Fromherz, Luminescence of Dye Molecules on Oxidized Silicon and Fluorescence Interference Contrast Microscopy of Biomembranes. *J. Opt. Soc. Am. B* 19 (2002) 1435-1453.
2. D. Braun, P. Fromherz, Fast Voltage Transients in Capacitive Silicon-to-Cell Stimulation observed with a Luminescent Molecular Electronic Probe. *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 2905-2908.
3. R. Gleixner, P. Fromherz, The Extracellular Electrical Resistivity in Cell Adhesion. *Biophys. J.* 90 (2006) 2600-2611.

Capacitors and Transistors

1. F. Wallrapp, P. Fromherz, TiO_2 and HfO_2 in Electrolyte-Oxide-Silicon Configuration for Applications in Bioelectronics. *J. Appl. Phys.* 99 (2006) 114103.
2. M. Voelker, P. Fromherz, Nyquist Noise of Cell Adhesion Detected in a Neuron-Silicon Transistor. *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 228102.

Ion Channels on Chip

1. M. Ulbrich, P. Fromherz, Opening of K^+ Channels by Capacitive Stimulation from Silicon Chip. *Appl. Phys. A* 81 (2005) 887-891.
2. M. Schmidtner, P. Fromherz, Functional Na^+ Channels in Cell Adhesion probed by Transistor Recording. *Biophys. J.* 90 (2006) 183-189.

Nerve Cells on Capacitors and Transistors

1. I. Schoen, P. Fromherz, The Mechanism of Extracellular Stimulation of Nerve Cells on an Electrolyte-Oxide-Semiconductor Capacitor. *Biophys. J.* submitted.
2. R. Schätzthauer, P. Fromherz, Neuron-Silicon Junction with Voltage-gated Ionic Currents. *Eur. J. Neurosci.* 10 (1998) 1956-1962.
3. A. Lambacher, M. Jenkner, M. Merz, B. Eversmann, R.A. Kaul, F. Hofmann, R. Thewes, P. Fromherz, Electrical Imaging of Neuronal Activity by Multi-Transistor-Array (MTA) Recording at 7.8 μm Resolution. *Appl. Phys. A* 79 (2004) 1607-1611.

Hybrid Devices

1. P. Bonifazi, P. Fromherz, Silicon Chip for Electronic Communication between Nerve Cells by Noninvasive Interfacing and Analog-Digital Processing. *Adv. Mat.* 14 (2002) 1190-1193.
2. R.A. Kaul, N.I. Syed, P. Fromherz, Neuron-Semiconductor Chip with Chemical Synapse between Identified Neurons. *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 038102.

Networks on Chips

1. G. Zeck, P. Fromherz, Noninvasive Neuroelectronic Interfacing with Synaptically Connected Snail Neurons Immobilized on a Semiconductor Chip. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98 (2001) 10457-10462.
2. M. Merz, P. Fromherz, Silicon Chip Interfaced with Geometrically Defined Net of Snail Neurons. *Adv. Funct. Mat.* 15 (2005) 739-744.

Brain Slices on Chip

1. M. Hutzler, P. Fromherz, Silicon Chip with Capacitors and Transistors for Interfacing Organotypic Brain Slice of Rat Hippocampus. *Eur. J. Neurosci.* 19 (2004) 2231-2238.
2. M. Hutzler, A. Lambacher, B. Eversmann, M. Jenkner, R. Thewes, P. Fromherz, High-Resolution Multi-Transistor Array Recording of Electrical Field Potentials in Cultured Brain Slices. *J. Neurophysiol.* (2006) in press.

Anton Zeilinger

Verschränkung – ein Quantenrätsel für jedermann*

Eines der interessantesten Phänomene der Quantenphysik ist die Verschränkung. Sie besagt, dass zwei (oder auch mehr) Quantenteilchen auf viel engere Weise miteinander zusammenhängen können, als dies nach der klassischen Physik möglich ist. Eine Messung an einem Teilchen ändert sofort den Quantenzustand des anderen, unabhängig von der Entfernung zwischen beiden. Diese Zusammenhänge können nicht durch Eigenschaften, die diese Teilchen lokal für sich selbst tragen, erklärt werden. Der vorliegende Aufsatz liefert eine allgemeinverständliche Darstellung der experimentellen Situation sowie der Bell'schen Ungleichung. Der Artikel wird abgeschlossen mit einer kurzen Diskussion möglicher philosophischer Konsequenzen.

1 Einführung

Die Quantenphysik wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts geschaffen, um das Verhalten von Atomen beschreiben zu können. Ihre Bedeutung reicht heute von technischen Anwendungen, wie etwa dem Transistor oder dem Laser, bis hin zu Elementarteilchen und der Physik des Universums. Sie liefert eine unglaublich präzise Naturbeschreibung. Alle ihre mathematischen Vorhersagen wurden auf das Genaueste im Experiment bestätigt.

Einige der Vorhersagen der Quantenphysik stellen aber lieb gewordene Aspekte unseres Weltbilds in Frage. In der Öffentlichkeit sind in diesem Zusammenhang bekannt die Schlagworte »Heisenberg'sche Un-

* Entnommen aus: A. Zeilinger, *Einsteins Spuk* (Bertelsmann 2005). In dem Buch war der Autor des Artikels aus literarischen Gründen ein gewisser »Professor A. Quantinger«.

schärfebeziehung« und »Quantensprung«. Am interessantesten ist allerdings wohl das Phänomen der Verschränkung, das zentral ist für Konzepte wie das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon und das Bell'sche Theorem. Wir werden diese Dinge jetzt im Detail besprechen.

Im Jahr 1935 veröffentlichte Albert Einstein gemeinsam mit Boris Podolsky und Nathan Rosen (EPR) eine Arbeit mit dem Titel »Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?«.¹ In dieser Arbeit zeigten EPR, dass nach der Quantenphysik zwei Systeme auf extrem enge Weise miteinander zusammenhängen können, viel enger, als dies für Systeme der klassischen Physik möglich ist.

Betrachten wir etwa zwei Teilchen, die miteinander zusammengestoßen sind und jetzt jedes für sich in eine andere Richtung davonfliegen. EPR zeigten, dass die Messung an einem der beiden Teilchen den Zustand des anderen Teilchens ändert, ganz egal, wie weit die Teilchen voneinander entfernt sind. Diese Auswirkung der Messung des einen Teilchens auf das andere findet sofort und ohne Zeitverzögerung statt, also mit unendlich großer Geschwindigkeit. Das scheint im Widerspruch zur Einsteinschen Relativitätstheorie zu stehen, nach der sich ja nichts schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten darf. Einstein hat dieses Phänomen auch als »spukhafte Fernwirkung« bezeichnet, und er hatte gehofft, dass es eine Möglichkeit gäbe, eine neue Physik zu finden, wo diese spukhafte Fernwirkung nicht auftritt.

Unmittelbar nach der Veröffentlichung der EPR-Arbeit befasste sich Erwin Schrödinger² mit dem Phänomen und erfand dafür die Bezeichnung »Verschränkung«. Er erkannte klar die tiefgreifenden Konsequenzen und sprach davon, dass die Verschränkung dasjenige Phänomen sei, das uns zwingt, von allen lieb gewordenen klassischen Vorstellungen, wie die Welt beschaffen sei, endgültig Abschied zu nehmen.

Die EPR-Arbeit wurde im Wesentlichen von den Physikern ignoriert. Man war zufrieden damit, dass die Quantenphysik eine so exakte Beschreibung der Natur lieferte und in ihren Anwendungen äußerst erfolgreich war. Die Situation änderte sich 1964 mit einer Veröffent-

- 1 A. Einstein, B. Podolsky und N. Rosen, »Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?«, Phys. Rev. 47, 777 (1935)
- 2 E. Schrödinger, »Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik«, Naturwissenschaften 23, 807; 823; 844 (1935)

lichung von John Bell³ unter dem Titel »On the Einstein Podolsky Rosen Paradox«. In dieser Arbeit zeigt Bell, dass es nicht möglich ist, das Verhalten solcher verschränkter Systeme zu verstehen, wenn man von gewissen »vernünftigen« Annahmen ausgeht, wie die Welt beschaffen sein sollte. Dies ist wohl die tiefendste Entdeckung der Physik seit Kopernikus, wie Henry Stapp einmal treffend bemerkt hat. Kopernikus hatte ja das alte Weltbild über den Haufen geworfen, nach dem die Erde im Mittelpunkt des Universums stand. Bell wiederum wirft das klassische Weltbild über den Haufen. Allerdings besteht ein wesentlicher Unterschied: Kopernikus lieferte gleichzeitig ein neues Weltbild, in dem die Planeten um die Sonne kreisen. Für den Fall der Quantenphysik haben wir dieses neue Weltbild noch nicht gefunden.

In den Jahren seit 1964 haben zahlreiche Experimente bewiesen, dass die Vorhersagen der Quantenphysik für verschränkte Teilchen voll und ganz zutreffen, dass also die Welt »wirklich so verrückt ist«, wie es der amerikanische Physiker Daniel Greenberger ausgedrückt hat. Interessanterweise und zur Überraschung aller früh an den wissenschaftlichen Untersuchungen der Verschränkung Beteiligten führten diese Experimente zu neuen Ideen einer Quanteninformationstechnologie. Die wichtigsten Konzepte hier sind Quantencomputer, Quantenkryptographie und Quantenteleportation, die wohl die Informationstechnologie der Zukunft darstellen werden.

Wir werden uns nun einer genauen Diskussion der Argumentation von Einstein, Podolsky und Rosen sowie von Bell zuwenden.

2 Einstein, Podolsky und Rosen

In den Naturwissenschaften im Allgemeinen und in der Physik im Speziellen möchten wir die Natur beschreiben. Man macht Beobachtungen und trifft, aufbauend auf diese Beobachtungen, Annahmen, was der Grund für das Beobachtete sein könnte. Ziel ist es, letztlich eine vollständige theoretische Beschreibung zu finden. Das Wesen einer erfolgreichen Theorie in der Physik ist es, Vorhersagen für künftige

3 J. S. Bell, »On the Einstein Podolsky Rosen Paradox«, Physics 1, 195-200 (1964)

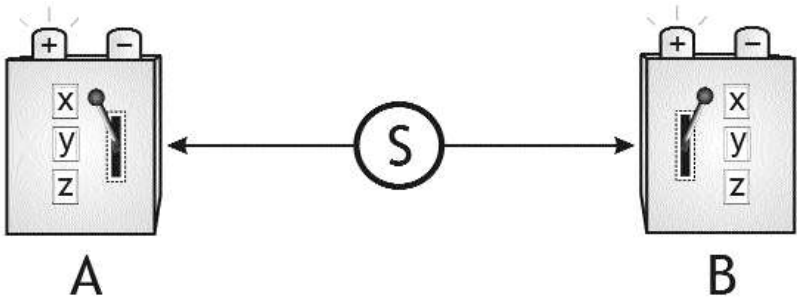


Abbildung 1: Anordnung zur experimentellen Beobachtung von Verschränkung. Eine Quelle S entsendet Teilchenpaare. Ein Teilchen wird von Messstation A, das andere von Messstation B gemessen. Mit einem Schalter an jeder Messstation kann entschieden werden, welche Art von Messung, x, y oder z, an dem Teilchen durchgeführt wird. Für jede der Schalterstellungen gibt es zwei mögliche Resultate, + oder -.

Beobachtungen zu liefern. Diese Vorhersagen können dann im Experiment überprüft werden. Eine Theorie ist so lange gültig, wie sie nicht durch ein Experiment widerlegt wird.

Wir betrachten eine Quelle S, die Teilchenpaare aussendet. Teilchen a fliegt zur Messstation A, Teilchen b zur Messstation B (Abb. 1).

Die Messapparate an beiden Stationen A oder B sind vollkommen identisch. Natürlich besitzen sie einen komplizierten inneren Mechanismus, der uns aber hier nicht interessieren muss. Es genügt, zu wissen, dass mit jedem Apparat drei verschiedene Messungen durchgeführt werden können. Welche Messung durchgeführt wird, bestimmen die Experimentatoren an der jeweiligen Messstation. Sie können auswählen, welche der drei Messungen an ihrem Teilchen durchgeführt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Schalters, der in drei verschiedenen Positionen stehen kann: x, y oder z. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Messapparats ist, dass auf jeder Seite nur zwei Messresultate möglich sind, nennen wir sie + und -. Außerdem nehmen wir an, dass jedes Teilchen, das von der Quelle S emittiert wurde, tatsächlich auch im jeweiligen Apparat registriert wird. Das heißt, jedes der Teilchen a und b wird für jede der Schalterstellungen x, y oder z entweder das Resultat + oder das Resultat - liefern. Die Quelle emittiert ein Teilchenpaar nach dem anderen, aber niemals zwei Paare zugleich.

Wir werden uns nun den möglichen Messresultaten zuwenden. Die Frage ist also, wie oft das Resultat + beziehungsweise das Resultat – bei welcher Schalterstellung auftreten wird und wie die Resultate, die wir mit den beiden Apparaten A und B erhalten, miteinander zusammenhängen. Wir folgen dabei im Wesentlichen der Argumentation von Einstein, Podolsky und Rosen in ihrer Originalarbeit.

Eine erste wichtige Beobachtung ist die, dass für jede der Schalterstellungen x, y oder z auf jeder der beiden Seiten, A oder B, die Messresultate + oder – gleich häufig vorkommen. Wenn wir also viele Teilchen messen, wird sowohl für Alice als auch für Bob das Resultat + in der Hälfte der Fälle auftreten und das Resultat – in der anderen Hälfte der Fälle. Die Abfolge der Messresultate untereinander ist rein zufällig. Eine typische Abfolge könnte sein:

+ – – + – + + – ...

Bisher haben wir die Messresultate an jeder Seite, Messstation A oder Messstation B, für sich alleine betrachtet. Und das wichtige Resultat, das wir erhalten haben, ist, dass diese Messergebnisse keinerlei Struktur aufweisen.

Da die Teilchen in Paaren erzeugt werden, liegt es nahe, nun zu untersuchen, welches Resultat, + oder –, bei Messstation A gemeinsam mit welchem Resultat bei Messstation B auftritt. Wir werden also die Korrelationen zwischen beiden Messresultaten ansehen. Welches Messresultat bei A gehört demnach zu welchem Messresultat bei B? Ganz einfach: Wir müssen nur schauen, welche Messresultate gleichzeitig auftreten, denn die beiden Teilchen a und b eines Paares werden ja gleichzeitig erzeugt, und die beiden Messstationen sind gleich weit von der Quelle entfernt. Solche gleichzeitigen Ereignisse nennt man Koinzidenzen. Resultat einer solchen Koinzidenzmessung könnte zum Beispiel sein, dass beim Apparat A, der so eingestellt sei, dass er die Eigenschaft x misst, das Resultat + auftritt, und gleichzeitig an Apparat B, der vielleicht darauf eingestellt ist, dass er Eigenschaft y misst, das Resultat – für das andere Teilchen dieses Paares.

Die Frage, die wir uns nun stellen, ist, welche Kombinationen von + oder – auf der einen Seite und + oder – auf der anderen Seite bei welchen Schalterstellungen vorkommen.

Beschränken wir uns zuerst auf diejenigen Fälle, wo auf beiden Seiten, A und B, die gleichen Schalterstellungen gewählt wurden. Auf jeder Seite gibt es drei mögliche Schalterstellungen, x, y und z. Die möglichen

Koinzidenzen sind also xx , yy und zz . Es stellt sich heraus, dass wir in allen drei Fällen für jedes einzelne Paar auf beiden Seiten das gleiche Resultat erhalten. Es kann allerdings $+$ oder $-$ sein. Wenn also Apparat A und Apparat B beide die gleiche Größe messen, so kommen als Resultate nur $++$ oder $--$ vor, entweder auf beiden Seiten $+$ oder auf beiden Seiten $-$. Verschiedene Resultate, $+ -$, $- +$ bei Apparat A und $-$ bei Apparat B, oder $- +$, $-$ bei A und $+$ bei B, treten nie auf. Dies gilt für alle drei möglichen Kombinationen von Schalterstellungen, xx , yy und zz . Ferner gilt, dass jede der beiden Möglichkeiten, $++$ und $--$, gleich oft auftritt.

Aus diesen Beobachtungen können wir nun eine sehr interessante Schlussfolgerung ziehen. Ist uns das Resultat für eine Seite, sagen wir, A, bekannt, $+$ oder $-$, so können wir mit Sicherheit das Resultat für die andere Seite, in diesem Fall B, vorhersagen. Das Resultat muss genau das gleiche sein, falls der Schalter an Apparat B in der gleichen Stellung ist wie der an Apparat A. Mit anderen Worten: Welche Messung auch immer auf einer Seite durchgeführt wird, x , y oder z , die andere Seite wird genau das gleiche Resultat erhalten, falls dort die gleiche Messung durchgeführt wird. Aber wie ist das zu erklären? Wir werden nun ein einfaches Modell aufstellen, das diese Korrelationen erläutert.

Wichtig ist, dass die beiden Teilchen a und b unabhängig voneinander sind, sobald sie die Quelle S verlassen haben. Es ist also vernünftig, anzunehmen, dass jedes Teilchen eine Eigenschaft trägt, die das spezifische Messresultat für dieses Teilchen festlegt. Um die Tatsache zu erklären, dass beide Teilchen dasselbe Resultat liefern, müssen die Eigenschaften für beide Teilchen dieselben sein. Ferner muss jedes Teilchen für alle drei Schalterstellungen, x , y und z , solche Eigenschaften tragen. Sie müssen ja bei jeder der möglichen Messungen beide das gleiche Resultat liefern. Und es könnte ja durchaus sein, dass die Schalterstellung geändert wird, nachdem die beiden Teilchen von der Quelle bereits abgeschickt wurden. Sie können also nicht vorher wissen, ob der Schalter auf x , y oder z stehen wird.

Die Annahme solcher Eigenschaften ist vernünftig und naheliegend. Das konkrete Messresultat, das wir erhalten, würde dann lediglich wiedergeben, dass das Teilchen eben die entsprechende Eigenschaft getragen hat. Wenn das Teilchen also für die Messung der Schalterstellung y die Eigenschaft $+$ trägt, wird das Resultat $+$ sein, wenn der Schalter auf y steht. Solche Eigenschaften würden auch vollkommen die Tatsache erklären, dass wir mit Sicherheit vorhersagen können, was das

Resultat auf der jeweils anderen Seite, sagen wir, B, sein wird, wenn wir das Resultat auf einer Seite, sagen wir, A, kennen. Diese Annahme, dass einem Messresultat, das mit Sicherheit vorhergesagt werden kann, eine Eigenschaft, ein Element der Wirklichkeit entspricht, nennt man die Realitätsannahme von Einstein, Podolsky und Rosen.

Im Prinzip könnten die perfekten Korrelationen aber auch dadurch zustande kommen, dass es eine unbekannte Art von Kommunikation zwischen beiden Apparaten, A und B, gibt. Dann würde zum Beispiel Apparat A, wenn er sein Teilchen gemessen hat, eine Nachricht an Apparat B senden, der mitteilt, wie die Schalterstellung bei ihm war und welches Messresultat herauskam. Apparat B würde dann dasselbe Messresultat angeben für den Fall, dass sein Schalter auf der gleichen Position steht. EPR nehmen jedoch an, dass beide Apparate so weit voneinander getrennt sind, dass die Informationsübertragung schneller als mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen müsste. Dies schließen sie allerdings aus, da nach Einsteins eigener Relativitätstheorie die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann. Dies nennt man die EPR-Lokalitätsannahme. Eine Theorie, die die Realitätsannahme und die Lokalitätsannahme in sich eingebaut hat, nennt man eine »lokal realistische Theorie«.

Unser lokal realistisches Modell, das wir soeben aufgestellt haben, kann die perfekten Korrelationen vollständig erklären, das heißt, diejenigen Messresultate, die auftreten, wenn an beiden Seiten dieselbe Schalterstellung gewählt wurde. Man nennt diese Eigenschaften, die jedes Teilchen für sich selbst trägt, verborgene Variable, da es nicht notwendig ist, dass sie einer direkten Beobachtung zugänglich sind. Sie müssen lediglich die Messergebnisse auf der jeweiligen Seite festlegen.

Wir stellen uns als nächstes die Frage, welche Messresultate unser Modell vorhersagt, wenn die Schalterstellungen bei Messstation A und bei Messstation B nicht die gleichen sind, wenn wir also alle Kombinationen von x , y und z zulassen. Aus unserem Modell folgt nicht, dass die Resultate nun auch in diesen Fällen auf beiden Seiten unbedingt gleich sein müssen. Dies galt ja nur dann, wenn die Schalterstellungen identisch waren. Es kann also jetzt nicht nur $++$ oder $-$ auftreten, sondern auch $+-$ oder $-+$. Es ist evident, dass unser Modell, das für perfekte Korrelationen aufgestellt wurde, nicht klar genug ist, um genau vorherzusagen, wie häufig diese beiden Möglichkeiten vorkommen werden.

John Bell konnte aber zeigen, dass diese Kombinationen nicht beliebig oft auftreten können, sondern dass es für deren Häufigkeit gewisse Grenzen gibt. Diese Grenzen werden durch die so genannte Bell'sche Ungleichung ausgedrückt.

3 Die Bell'sche Ungleichung für Nichtphysiker

Um die Bell'sche Ungleichung für die Allgemeinheit leichter zugänglich zu machen, übersetzen wir im Folgenden ihre Sprache in die Alltagssprache. Das Argument folgt aber im Wesentlichen einer Arbeit von Eugene Wigner, die auf Bell aufbaut.⁴ Anstatt der Teilchenpaare, die der Physiker nimmt, betrachten wir identische Zwillinge. Den drei Messungen x , y oder z entspricht die Beobachtung dreier Eigenschaften: Körpergröße, Haarfarbe und Augenfarbe. Bei der Körpergröße sind dies »groß« oder »klein«, bei der Haarfarbe »blond« oder »schwarzhaarig« und bei der Augenfarbe »blau« oder »braun«. Wir beschränken uns auf Beobachtungsergebnisse, die nur zwei Antworten entsprechend $+$ oder $-$ zulassen. Bei der Körpergröße sind dies groß oder klein, bei der Haarfarbe blond oder schwarz und bei der Augenfarbe blau oder braun. Zwillinge, die abweichende Eigenschaften, wie etwa Augenfarbe oder Haarfarbe, haben, lassen wir außer Acht.

Ganz offenbar zeigen unsere identischen Zwillinge die vorher diskutierten perfekten Korrelationen. Ist einer der Zwillinge etwa groß, hat blaue Augen und blonde Haare, wissen wir, dass der andere Zwillling auch groß sein wird, blaue Augen und blonde Haare hat. Im Sinne von Einstein, Podolsky und Rosen sind diese drei Eigenschaften – Größe, Augenfarbe und Haarfarbe – Elemente der Realität, da wir aufgrund der Beobachtung des einen Zwillinges mit Sicherheit die Eigenschaften des anderen vorhersagen können. Wir kennen auch einen Grund für diese Identität: Es ist die Tatsache, dass beide dieselben Gene tragen. Diese Gene entsprechen den lokalen verborgenen Variablen. Wenn wir nun eine große Zahl von solchen Zwillingspaaren betrachten, die alle entweder groß oder klein, blond oder schwarzhaarig, blauäugig oder

4 E. P. Wigner, »On hidden variables and quantum mechanical probabilities«, Am. J. Phys. 38, 1005 (1970)

braunäugig sind, gibt es natürlich alle nur denkbaren Kombinationen. Für die genannten drei Eigenschaften sind es deren acht:

- groß, blauäugig, schwarzhaarig
- groß, blauäugig, blond
- groß, braunäugig, schwarzhaarig
- groß, braunäugig, blond
- klein, blauäugig, schwarzhaarig
- klein, blauäugig, blond
- klein, braunäugig, schwarzhaarig
- klein, braunäugig, blond

Von all den vielen Zwillingspaaren, die wir betrachten, wird eine gewisse Zahl groß und schwarzhaarig mit blauen Augen sein, eine gewisse Zahl groß und blond mit blauen Augen und so weiter. Wie viele es sind, ist unbekannt, und das müssen wir auch gar nicht wissen. Wir können aber einige ganz einfache Aussagen treffen, zum Beispiel:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der großen} \\ \text{Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und schwarzen Haaren} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und blonden Haaren} \end{array} \right]$$

Das ist vollkommen evident. Ein großer Zwilling mit blauen Augen muss innerhalb unseres Modells entweder schwarze oder blonde Haare haben. Andere Haarfarben betrachten wir ja nicht.

Genauso gilt:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der großen} \\ \text{Zwillingspaare} \\ \text{mit schwarzen Haaren} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und schwarzen Haaren} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und schwarzen Haaren} \end{array} \right]$$

Vielleicht wird die Leserin beziehungsweise der Leser schon ungeduldig, da es sich ja wirklich um triviale und selbstverständliche Aussagen handelt. Wir bitten aber noch um ein klein wenig Geduld, denn wir brauchen nur mehr eine einzige Aussage, um unser Argument durchziehen zu können. Sie lautet:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der blonden} \\ \text{Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und blonden Haaren} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{kleinen Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \\ \text{und blonden Haaren} \end{array} \right]$$

Auf Basis der drei eigentlich recht primitiven Aussagen, die wir gerade getroffen haben, erhalten wir die Bell'sche Ungleichung für Zwillingspaare:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der großen} \\ \text{Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{großen Zwillingspaare} \\ \text{mit schwarzen Haaren} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{blonden Zwillingspaare} \\ \text{mit blauen Augen} \end{array} \right]$$

Das Symbol \leq bedeutet, dass die linke Seite kleiner oder höchstens gleich groß ist wie die Summe der rechten Seite. Ehe wir auf die Bedeutung der Bell'schen Ungleichung eingehen, überlegen wir uns kurz noch einmal, was wir bisher gemacht haben: Wir schauten uns identische Zwillinge an, und wir betrachteten nur drei verschiedene Eigenschaften: Größe, Haarfarbe und Augenfarbe; wir haben uns auf jeweils zwei Varianten dieser Eigenschaften beschränkt: groß – klein, blond – schwarz, blau – braun. Alle anderen Zwillinge haben wir ausgeschlossen. Wir haben uns nicht alle möglichen Zwillinge angesehen, sondern nur die mit diesen spezifischen Eigenschaften, also keine anderen Augen- oder Haarfarben.

Wir sind nun durch ganz einfache Überlegungen zu der Bell'schen Ungleichung gekommen. Dass diese richtig ist, sehen wir sofort. Wir brauchen uns nur zu überlegen, dass jede der drei Zahlen in der Bell'schen Ungleichung nach den darüber stehenden Beziehungen aus zwei anderen Zahlen zusammengesetzt ist. Die beiden Zahlen, aus denen die (Zahl der großen Zwillingspaare mit blauen Augen) zusammengesetzt ist, kommen auch auf der rechten Seite vor, nämlich die (Zahl der großen Zwillingspaare mit blauen Augen und schwarzen Haaren) und die (Zahl der großen Zwillingspaare mit blauen Augen und blonden Haaren). Zusätzlich gibt es dann auf der rechten Seite noch die (Zahl der großen Zwillingspaare mit braunen Augen und schwarzen Haaren) und die (Zahl der kleinen Zwillingspaare mit blauen Augen und blonden Haaren). Nur wenn diese letzten beiden jeweils Null sind, wenn es also keine solchen Zwillinge gibt, dann gilt das Gleichheitszeichen in der Bell'schen Ungleichung. Sonst muss die linke Seite kleiner sein als die rechte.

So unschuldig die eben gefunden Aussage aussieht, so wichtig ist sie für die moderne Physik. Die Bell'sche Ungleichung gilt für alle Paare von identischen Objekten. Alles, was wir benötigen, um die Bell'sche Ungleichung in einer bestimmten Situation anzuwenden, ist eine Beschränkung auf zweiwertige Eigenschaften – Eigenschaften, die nur

zwei Möglichkeiten zulassen. Im täglichen Leben wird die Bell'sche Ungleichung immer richtig sein.

Übersetzen wir nun die Bell'sche Ungleichung in unser oben diskutiertes Experiment mit den Teilchenpaaren. Auch dort haben wir drei Eigenschaften, die wir beobachten, x , y oder z , und jeweils zwei Resultate, $+$ oder $-$, die perfekt miteinander korreliert sind, wenn auf beiden Seiten, A oder B, dieselbe Eigenschaft gemessen wird. Wir brauchen demnach nur die Sprache, die wir bei den Zwillingen verwendet haben, in die Sprache in unserem Teilchenmodell zu übersetzen. Verwenden wir also folgende Entsprechungen:

- Der Größe entspricht die Eigenschaft x , groß entspricht dem Resultat $+$, klein dem Resultat $-$.
- Der Augenfarbe entspricht die Eigenschaft y , blaue Augen entsprechen $+$, braune Augen entsprechen $-$.
- Die Haarfarbe entspricht der Eigenschaft z , schwarz entspricht $+$ und blond entspricht $-$.

Ein kleiner Schritt ist noch notwendig. Im Gegensatz zum Fall der Zwillinge, wo wir an einem Zwilling alle diese Eigenschaften, in unserem Fall Größe, Haarfarbe und Augenfarbe, gleichzeitig beobachten konnten, messen wir an jedem der beiden Quantenteilchen jeweils nur eine, x , y oder z . Das tut dem Argument jedoch keinen Abbruch. Wir könnten ja auch bei Zwillingen so vorgehen, dass wir uns bei einem etwa die Größe ansehen und beim anderen die Haarfarbe. Wenn wir also an dem einen feststellen, dass er groß ist, und an dem anderen, dass er blond ist, wissen wir, dass beide groß und blond sind, da sie ja identisch sind.

Aus der Bell'schen Ungleichung für Zwillingspaare erhalten wir mit dieser Übersetzung direkt die Bell'sche Ungleichung für Teilchenpaare:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ ++ \text{ Resultate} \\ \text{bei Apparat A auf } x \\ \text{und Apparat B auf } y \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ ++ \text{ Resultate} \\ \text{bei Apparat A auf } x \\ \text{und Apparat B auf } z \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ +- \text{ Resultate} \\ \text{bei Apparat A auf } y \\ \text{und Apparat B auf } z \end{array} \right]$$

Wir haben also jetzt die ursprünglich für identische Zwillinge hergeleitete Bell'sche Ungleichung in den Fall von identischen Teilchen in unserem Gedankenexperiment übersetzt. Die Frage ist nun, wie sich Teilchenpaare in der wirklichen Welt verhalten. Viele der existierenden Experimente wurden mit polarisierten Lichtteilchen, den Photonen, durchgeführt. Wir werden dies jetzt im Detail diskutieren.

4 Verschränkte Photonen

Die Polarisation ist eine Eigenschaft des Lichtes, die auch im Alltag bekannt ist. Sie beschreibt, in welcher Art das Licht schwingt, horizontal – hin und her, vertikal – auf und ab, oder in irgendeiner anderen Richtung. Fotografen verwenden zum Beispiel Polarisationsfilter, um gewisse Spiegelungen auszublenken. Auch einzelne Lichtteilchen, Photonen, tragen Polarisation. Nehmen wir ein beliebiges Photon und fragen wir nach seiner Polarisation. Wir nehmen also eine Messung seiner Polarisation vor und bestimmen, ob das Photon entlang einer bestimmten Richtung polarisiert ist oder nicht. Für das Photon gibt es nur zwei Möglichkeiten: Entweder ist es parallel zu dieser Richtung polarisiert oder rechtwinklig dazu.

Wir übertragen nun das Bild unserer Teilchenpaare auf Paare von Photonen. Man kann im Experiment sehr leicht Paare von Photonen erzeugen, bei denen die Polarisationen beider Photonen sehr eng miteinander zusammenhängen, also nach Schrödinger verschränkt sind, wie wir es vorher für die Teilchenpaare diskutiert hatten. Es gibt verschiedene Arten dieser Verschränkung. Welche vorliegt, hängt davon ab, welche Quelle man auswählt. Wir nehmen an, dass wir eine Quelle haben, wo beide Photonen immer die gleiche Polarisation zeigen. Entweder sind also beide Photonen horizontal oder beide vertikal polarisiert. Den drei Messungen x , y oder z entsprechen hier Messungen der Polarisation entlang von drei verschiedenen Richtungen (Abb. 2).

Durch die Kombination des polarisierenden Strahlteilers PBS mit einer gedrehten Halbwellenplatte HWP lässt sich die Polarisation entlang einer beliebigen Richtung messen. Wir betrachten drei verschiedene Stellungen der Halbwellenplatte HWP, was der Messung der Polarisationen entlang dreier verschiedener Richtungen entspricht. Wir bezeichnen die Resultate der Messung der Polarisation entlang der ersten Richtung mit H und V , entlang der zweiten Richtung mit H' und V' und entlang der dritten Richtung mit H'' und V'' . Nun haben wir wieder drei verschiedene Messgrößen: die Polarisation entsprechend den drei möglichen Orientierungen des Polarisators und jeweils zwei Resultate, horizontal oder vertikal, bezüglich der gewählten Richtung.

Betrachten wir wieder zuerst die Fälle, wo auf beiden Seiten bei A und B die Polarisation entlang der gleichen Richtung gemessen wird. Wieder treten auf beiden Seiten die gleichen Resultate auf. Es gibt also in diesem Fall nur die folgenden sechs Kombinationen: H – H , V – V , H' –

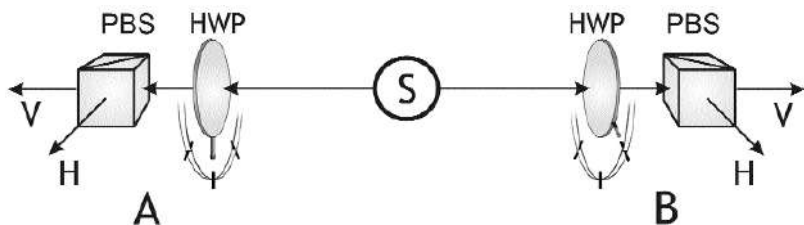


Abbildung 2: Experiment mit Photonenpaaren. Die Quelle S erzeugt Photonenpaare. Eines der Photonen wird zu Messapparat A, das andere Photon zu Messapparat B geschickt. Die Polarisation jedes Photons wird mit einem polarisierenden Strahlteiler (PBS) gemessen. Je nachdem, ob das Photon horizontal oder vertikal polarisiert ist, kommt es im H-Strahl oder V-Strahl heraus und kann dort nachgewiesen werden. Die Messung der Polarisation entlang verschiedener Richtungen erreicht man durch die Halbwellenplatte (HWP). Diese dreht die Polarisation des Photons um einen gewissen Winkel, der von der Orientierung der Halbwellenplatte abhängt. Die Messung der Polarisation mit feststehendem PBS und gedrehter HWP ist genau so, als wenn man die Messung mit einem gedrehten PBS gemacht hätte. Man kann damit die Polarisation entlang einer beliebigen Richtung messen.

H' , $V'-V'$, $H''-H''$ und $V''-V''$. Betrachten wir nun die Fälle, wo wir auf beiden Seiten verschiedene Polarisatorstellungen haben, so können wir die bisherige Bell'sche Ungleichung für Teilchen direkt in die jetzige Situation übersetzen. Wir brauchen nur das Resultat H , H' oder H'' in $+$ übersetzen und das Resultat V , V' oder V'' in $-$. Die drei Orientierungen entsprechen den drei Messrichtungen der Polarisation, das heißt, den drei Einstellungen der Halbwellenplatte HWP. Wir erhalten damit die Bell'sche Ungleichung für polarisationsverschränkte Photonen:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{Paare, bei denen} \\ \text{Photon 1 Polarisation } H \\ \text{zeigt und Photon 2} \\ \text{Polarisation } H' \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{Paare, bei denen} \\ \text{Photon 1 Polarisation } H \\ \text{zeigt und Photon 2} \\ \text{Polarisation } H'' \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Zahl der} \\ \text{Paare, bei denen} \\ \text{Photon 1 Polarisation } H' \\ \text{zeigt und Photon 2} \\ \text{Polarisation } V'' \end{array} \right]$$

Damit haben wir eine direkt überprüfbare experimentelle Aussage gewonnen. Es ergibt sich nun die Frage, ob Photonen im Experiment tatsächlich diese Bedingung, diese Bell'sche Ungleichung erfüllen, oder ob sie sie verletzen, das heißt, ob die Zahl der Paare, wo das erste Photon die Polarisation H zeigt und das zweite die Polarisation H' , in gewissen Fällen größer sein kann als die Summe der beiden anderen Zahlen. Das Interessante ist nun, dass dieser Fall tatsächlich auftreten kann.

Es wurde in zahlreichen Experimenten beobachtet,⁵ dass die Bell'sche Ungleichung nicht gilt. Die Bell'sche Ungleichung wird demnach von unseren Photonenpaaren verletzt. Es müssen also die Annahmen, die in ihre Herleitung eingeflossen sind, nämlich die Annahmen des lokalen Realismus, für unsere Photonenpaare nicht stimmen. Das Experiment sagt uns folglich, dass die Weltanschauung des lokalen Realismus nicht gilt. Eine philosophische Frage darüber, wie die Welt beschaffen ist, wurde also hier durch das Experiment eindeutig entschieden.

Interessanterweise wird genau diese Verletzung der Bell'schen Ungleichung theoretisch von der Quantenphysik vorhergesagt. Wir haben damit eine perfekte Übereinstimmung zwischen den Vorhersagen der Quantenphysik und der experimentellen Beobachtung, und einen Widerspruch zum Modell des lokalen Realismus.

5 Was kann das bedeuten?

Wie ist es möglich, dass eine so einfache Aussage wie die Bell'sche Ungleichung im Experiment nicht stimmt? Die Überlegungen, die zu der Ungleichung geführt haben, waren ja extrem einfach – so einfach, dass schon der griechische Philosoph Aristoteles sie hätte herleiten können. Man braucht dazu ja keine Quantenphysik. Aristoteles hätte aber sicher nie gedacht, dass dies ein interessantes Problem sein könnte. Im Gegenteil: Er hätte es wahrscheinlich als uninteressant abgetan, da sich die Natur vernünftigerweise so verhalten muss. Denken wir nur an unser Beispiel mit den identischen Zwillingen, das eine perfekte Erklärung der Korrelationen zwischen Zwillingspaaren lieferte. Quantenteilchen verhalten sich also nicht wie identische Zwillinge, obwohl sie die gleichen Resultate zeigen. Wenn wir an ihnen die gleiche Eigenschaft messen, kann dies nicht so wie bei Zwillingen dadurch erklärt werden, dass sie diese Eigenschaft bereits vor der Beobachtung getragen haben.

5 Für eine Übersicht siehe: A. Zeilinger, G. Weihs, T. Jennewein und M. Aspelmeyer, »Happy centenary, photon«, *Nature* 433, 230 (2005)

Welche Lehre ziehen wir also aus der Verletzung der Bell'schen Ungleichung? Da sie nicht stimmt, muss zumindest eine der Annahmen, die wir zu ihrer Herleitung getroffen haben, falsch sein. Was waren diese Annahmen?

Die erste Grundannahme war die des Realismus. Das war die Idee, dass ein experimentelles Resultat in irgendeiner Form durch Eigenschaften der Teilchen bestimmt ist. Die zweite Grundannahme war die Lokalisierungsannahme. Das war die Annahme, dass die wirkliche physikalische Situation von, sagen wir, Messapparat B inklusive dem Teilchen b unabhängig davon sein muss, welche Messung gleichzeitig an Teilchen a durch den Messapparat A durchgeführt wird.

Eine dritte Annahme, die wir implizit verwendet haben, aber nicht explizit ausgedrückt haben, ist die, dass jedes Teilchen Instruktionen für alle drei Möglichkeiten besitzen muss. Die zugrunde liegende Annahme ist, dass es Sinn macht, sich zu überlegen, welche experimentellen Resultate auftreten könnten, auch wenn nur eine bestimmte Messung durchgeführt wird. Für den Fall der Zwillinge bedeutet dies, dass es Sinn macht, sich zu sagen, dass zum Beispiel große, blauäugige Zwillinge entweder blondes oder schwarzes Haar haben müssen, auch wenn man dies nicht beobachtet. Im Falle der Messung an zwei Teilchen bedeutet dies, dass es Sinn macht, sich zu überlegen, was das Resultat etwa bei der Schalterstellung z wäre, auch wenn man nur ein Teilchen an Schalterstellung x und das andere nur an Schalterstellung y misst.

Wir diskutieren nun einige der möglichen philosophischen Konsequenzen des Zusammenbruchs des lokalen Realismus. Es könnte also sein, dass die Realitätsannahme nicht stimmt. Dies würde im Grunde genommen bedeuten, dass die experimentell beobachtete Eigenschaft in einem ganz konkreten Experiment nicht eine Eigenschaft der physikalischen Wirklichkeit ist, ehe die Beobachtung durchgeführt wird. Letztlich heißt das, dass die Wirklichkeit von der Entscheidung des Beobachters abhängt, welche Messung er durchführt, denn der Beobachter, der ein bestimmtes Experiment macht, kann ja frei entscheiden, welche Messung er durchführt – das heißt in unserem Fall, welche Schalterstellung er wählt, oder entlang welcher Richtung er die Polarisation eines Photons misst. Der Zusammenbruch des Realismus würde bedeuten, dass das dann gemessene Resultat keine Eigenschaft reflektiert, die vor der Beobachtung und unabhängig von ihr existiert hat.

Es könnte auch sein, dass die Lokalitätsannahme nicht gilt. Ein solcher Zusammenbruch der Lokalität könnte zum Beispiel bedeuten, dass irgendetwas an unserer Vorstellung von räumlicher Trennung falsch ist. Zwei Orte, die uns als sehr getrennt erscheinen, wären für Quantensysteme nicht getrennt. Ein Quantensystem, das aus zwei oder mehr verschränkten Teilchen besteht, bleibt ein Ganzes, unabhängig davon, wie weit die einzelnen Komponenten des Systems voneinander getrennt sind. Man könnte aber auch ganz einfach annehmen, dass die verschiedenen Teile des Apparats Information mit unendlich großer Geschwindigkeit austauschen.

Ein Zusammenbruch der dritten Annahme würde bedeuten, dass man nur dann über Eigenschaften von Systemen sprechen darf, wenn sie tatsächlich beobachtet werden. Einfach ausgedrückt: die Frage »Was wäre, wenn?« wäre illegal. Dies widerspräche aber mit Sicherheit unserer Alltagserfahrung. Wir steuern unser Verhalten ja immer in der Weise, dass wir verschiedene Alternativen überlegen und bestimmte wegen der möglichen Konsequenzen ausschließen. Um zu wissen, was geschieht, wenn man beispielsweise eine dicht befahrene Autobahn zur Hauptverkehrszeit mit geschlossenen Augen überquert, ist es nicht unbedingt notwendig, dieses Experiment tatsächlich durchzuführen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht über die philosophische Frage, nämlich die Frage, was die philosophischen Konsequenzen der Verletzung der Bell'schen Ungleichung sind, keine Übereinstimmung darüber, welche Position man stattdessen anzunehmen hat. Während Experimente klar ergeben haben, dass der lokale Realismus eine unhaltbare Position ist, ist nicht klar, welche philosophische Position man stattdessen annehmen kann. Die meisten Physiker interpretieren die Verletzung der Bell'schen Ungleichung in der Weise, dass sie sagen, die Quantenphysik sei nichtlokal. Diese Nichtlokalität ist genau das, was Albert Einstein als spukhaft bezeichnet hat, da wie durch einen Spuk die Messung an einem Teilchen das andere beeinflusst.

Die andere Möglichkeit wäre, das Bild einer Wirklichkeit aufzugeben, die in jeder Weise unabhängig von uns existiert. Dies würde bedeuten, dass wir durch unsere Messung, durch unsere Entscheidung, welche Messung wir durchführen, einen wesentlichen Einfluss darauf ausüben, was Wirklichkeit sein kann. Es gibt tatsächlich Hinweise darauf, dass dies wahrscheinlich die bessere Antwort ist. Das signifikanteste Resultat in diesem Zusammenhang ist das so genannte Kochen-Specker-

Paradoxons.⁶ Es würde zu weit gehen, dies hier im Detail zu erläutern. Das Resultat muss uns jetzt ausreichen. Seine Aussage ist, dass es auch für einzelne Quantensysteme nicht möglich ist, ihnen Elemente der Realität zuzuordnen, die alle experimentellen Resultate erklären. Da Kochen und Specker nur Messungen an einzelnen Quantenteilchen betrachten, kommt die Lokalitätsannahme naturgemäß gar nicht zum Tragen.

Im Prinzip wäre aber noch eine ganz andere, extreme Position tragbar, oder zumindest denkbar. Dies wäre die Annahme eines totalen Determinismus. In diesem Fall wäre alles vorherbestimmt, einschließlich der Entscheidungen des Beobachters, welche Größe er an einem System misst. Es stellt sich also dann nicht die Frage, welche Eigenschaften die Teilchen hätten, wenn wir etwas anderes an ihnen messen, und der logische Gedankengang der Bell'schen Ungleichung kann gar nicht durchgezogen werden. Dass eine solche Position den Naturwissenschaften vollkommen den Boden unter den Füßen wegziehen würde, ist offenkundig. Welche Bedeutung hätte es, in einem Experiment eine Frage an die Natur zu stellen, wenn die Natur selbst diese Frage determinieren kann?

Während wir also hier die Antwort auf diese philosophischen Fragen offenlassen, gibt es Hinweise, dass all dies mit der Rolle der Information zu tun hat. Vielleicht ist es so, dass man die beiden Konzepte Information und Wirklichkeit nicht voneinander trennen darf.⁷

6 S. Kochen und E. Specker, »The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics«, *Journal of Mathematics and Mechanics* 17, 59 (1967)

7 A. Zeilinger, *Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik*. C.H. Beck (2003)

Mark Walker

Naturwissenschaftler und Nationalsozialismus¹

In diesem Aufsatz soll anhand von Primärquellen aufgezeigt werden, wie Naturwissenschaftler ihre Geschichte in ihren eigenen Worten erzählen und damit auch die »Grautöne« beleuchtet werden, die das Verhältnis zwischen Naturwissenschaft und Nationalsozialismus beschreiben. Der Hauptfokus hier liegt auf der Physik, aber vergleichbare Beispiele lassen sich auch in den anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen finden.

1 Albert Einstein, Max von Laue und »der unpolitische Naturwissenschaftler«²

Die Physiker und Nobelpreisträger Albert Einstein und Max von Laue haben in Berlin während der frühen Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts zusammengearbeitet und wurden Freunde. Einstein war außerhalb Deutschlands, als die Nationalsozialisten an die Macht kamen,

- 1 Department of History, Union College, Schenectady, NY USA, walkerm@union.edu.
- 2 Für die »unpolitische Ideologie«, siehe Mark Walker, »Legenden um die deutsche Atombombe«, Vierteljahrshefte für Zeitgeschichte, 38 (1990), S. 45-74 und Herbert Mehrrens, »Verantwortungslose Reinheit: Thesen zur politischen und moralischen Struktur der mathematischen Wissenschaften am Beispiel des NS-Staates«, in Georges Fülgraf und Annegret Falter (Hrsg.), Wissenschaft in der Verantwortung: Möglichkeiten der institutionellen Steuerung, Frankfurt am Main 1990, S. 37-54; für Einstein, siehe Jürgen Renn (Hrsg.), Albert Einstein – Ingenieur des Universums. 100 Autoren für Einstein, Weinheim 2005.

und ist nie zurückgekehrt. Als die antisemitischen Maßnahmen der NS-Regierung klar wurden und jüdische Naturwissenschaftler ihre Stellen verloren haben, hat Einstein seinen Ruhm benutzt, um öffentlich zu protestieren. So konnte der Physiker als Blitzableiter für Angriffe von Nationalsozialisten und ihren Verbündeten in Deutschland wirken.

»[...] Dass ich über die Ereignisse hier sehr traurig bin, brauche ich kaum zu versichern; das Schlimmste ist die vollkommene Ohnmacht etwas dagegen zu tun. Was Aufsehen erregt, verschlimmert die Lage nur.

Mit Deinem Fortgehen von hier ist mir Berlin zum großen Teil verödet; trotz Planck, Schrödinger und manchen Anderen. Aber warum musstest Du auch politisch hervortreten! Ich bin weit entfernt, Dir aus Deinen Äußerungen einen Vorwurf zu machen. Nur, finde ich, soll der Gelehrte damit zurückhalten. Der politische Kampf fordert andere Methoden und andere Interessen, als die wissenschaftliche Forschung. Der Gelehrte kommt in ihm in der Regel unter die Räder.

So ist's nun auch mit Dir gegangen. Aus den Trümmern lässt sich, was war, nicht wieder zusammensetzen. Aber wenn wir uns auch nur noch selten sehen sollten: ich denke, wir halten uns beide in gutem Andenken.«

Max von Laue an Albert Einstein
(14. Mai 1933)³

»Ich habe erfahren, dass meine nicht geklärte Beziehung zu solchen deutschen Körperschaften, in deren Mitgliederverzeichnis mein Name noch steht, manchen meiner Freunde in Deutschland Ungelegenheiten bereiten könnte. Deshalb bitte ich Dich, gelegentlich dafür zu sorgen, daß mein Name aus den Verzeichnissen dieser Körperschaften gestrichen wird. Hierher gehört z. B. die Deutsche Physikalische Gesellschaft, die Gesellschaft des Ordens pour le Merite. Ich ermächtige Dich ausdrücklich, dies für mich zu veranlassen. Dieser Weg

3 Max von Laue an Albert Einstein (14. Mai 1933) Einstein Papers [EP] California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.

dürfte der richtige sein, da so neue theatralische Effekte vermieden werden.«

Albert Einstein an Max von Laue
(5. Juni 1933)⁴

»Bei der gestrigen Rückkehr von einer wundervollen Auto-Fahrt nach dem südlichen Schwarzwald fand ich hier Deinen Brief vom 5. 6. Ich habe daraufhin Deinen Austritt aus der Deutschen Physikalischen Gesellschaft dem Geschäftsführer mitgeteilt und Deinen Brief sodann an Planck weitergegeben.

So sehr ich Dir dankbar bin, dass Du uns die Lage möglichst zu erleichtern strebst, so konnte ich Beides doch nicht ohne die herzlichste Betrübnis tun. Ich hoffe, dass in nicht zu langer Zeit die Geister sich beruhigt haben werden, und dass dann die Deutsche Physikalische Gesellschaft in der einen oder anderen Form die Verbindung mit Dir wiederherstellen kann.«

Max von Laue an Albert Einstein
(14. Juni 1933)⁵

»Ich benutze eine besondere Gelegenheit, Dir diesen Brief zusen-
den. Er soll Dir zunächst einen herzlichen Gruß bringen. Daneben
die Mitteilung, dass die Berliner Physik, trotzdem ihr noch weite-
re schmerzliche Verluste bevorstehen, doch in der Sache ungestört
weiter geht. Im Schrödinger Seminar wird munter referiert, und wir
brauchen uns auch keineswegs zu scheuen, daselbst von der Re-
lativitätstheorie zu reden. Nicht einmal mir ist etwas widerfahren,
als ich in der ersten Vorlesung dieses Semesters von der Relativi-
tätstheorie sprach, »die bekanntlich aus dem Hebräischen übersetzt
ist«. Du verstehst wohl die Anspielung auf den »berühmten« Auf-
ruf der so genannten Studentenschaft »wider den undeutschen Geist«.
Oder hast Du dies Prachtstück unfreiwilligen Humors nicht zu sehen
bekommen?

4 Albert Einstein an Max von Laue (5. Juni 1933)

5 Max von Laue an Albert Einstein (14. Juni 1933) EP.

Wo hältst Du Dich zurzeit auf? Von Oxford sollst Du vorige Woche weggegangen sein, man munkelt etwas von Glasgow. Wir sind hier schon sehr beruhigt, Dich auf englischem Boden zu wissen. Wärest Du auf französischem, so fürchteten wir, Du könntest wieder in die Politik verwickelt werden. Und das möchten wir nicht, Deinetwegen wie unseretwegen. Denn man macht hier so ungefähr die Gesamtheit der deutschen Gelehrten dafür verantwortlich, wenn Du etwas Politisches tust.

Mit großer Freude habe ich von den Hilfsunternehmen für deutsche Vertriebene in England, Holland und Amerika gehört. Leider ist die Freude nicht ganz frei von Beschämung. Vor wenigen Jahren noch schuf man Hilfskomitees für Armenier und andere, halb wilde Völkerschaften, wenn sie politisch bedrückt wurden. Und nun muss man uns so helfen; das ist bitter [...]«

Max von Laue an Albert Einstein
(26. Juni 1933)⁶

Die Physiker Philipp Lenard und Johannes Stark, auch Nobelpreisträger, bildeten während der Weimarer Republik eine Ausnahme, weil sie offen und begeistert ihre Unterstützung für Adolf Hitler, die NSDAP und »deutsche Physik«⁷ zugesagt haben. Die »deutsche Physik« war eine politische Bewegung innerhalb der Physikergemeinschaft, die argumentierte, dass nur »Arier« gute Physik schaffen konnten und man Deutschland von »jüdischer Physik« bereinigen solle. Nachdem Hitler Kanzler wurde, hat Stark einige sehr einflussreiche Posten erhalten, einschließlich der Präsidentschaften der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Wie viele andere führende Nationalsozialisten versuchte Stark seinen eigenen Ein-

6 Max von Laue an Albert Einstein (26. Juni 1933) EP.

7 Für »deutsche Physik«, siehe Alan Beyerchen, *Wissenschaftler unter Hitler. Physiker im Dritten Reich*, Köln 1980; Steffen Richter, »Die ›Deutsche Physik‹«, in: Herbert Mehrtens und Steffen Richter (Hrsg.), *Naturwissenschaft, Technik und Ideologie. Beiträge zur Wissenschaftsgeschichte des Dritten Reiches*, Frankfurt am Main 1980, S. 116-141; Klaus Hentschel, *Physics and National Socialism: An Anthology of Primary Sources*, Basel 1996; und Freddy Litten, *Mechanik und Antisemitismus. Wilhelm Müller (1880-1968)*, München 2000.

flussbereich zu stärken und der »Diktator der Physik« zu werden.⁸ Seine Anstrengungen haben sich bei der Physikertagung 1933 in Würzburg zugespitzt, bei der er versuchte, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) zu werden, jedoch ohne Erfolg. Vor Starks Vortrag gehalten hat, sprach Max von Laue (siehe unten). Als Stark danach zu Worte kam, hat er zu heftig reagiert und seine Zuhörer verunsichert. Am Ende wurde ein anderer Physiker Präsident der DPG – eine schmerzhaft Niederlage für Stark.

»[...] Einen Gedenktag besonderer Art hat die Physik am 22. Juni dieses Jahres feiern können. An diesem Tage waren es 300 Jahre, dass der Prozess Galileis vor der Inquisition endigte. Den Anlass zu dem Prozess gab bekanntlich die Lehre des Kopernikus über die Bewegung der Erde und der anderen Planeten um die Sonne, eine Lehre, die damals als den hergebrachten Anschauungen widerstrebend ähnliches Aufsehen und Aufregung hervorrief, wie in unserem Jahrhundert die Relativitätstheorie. Galilei war nicht ihr einziger, aber ihr erfolgreichster Verfechter, weil er sie durch seine wundervollen Entdeckungen der Jupitermonde, der Phasen der Venus und der Eigendrehung der Sonne so überzeugend zu stützen vermochte. Der Prozess endigte mit der Verurteilung. Galilei musste die Kopernikanische Lehre abschwören und wurde zu lebenslänglichem Kerker verdammt [...]

An diese Verurteilung hat sich nun die bekannte Legende geheftet, Galilei habe, während er den Widerruf der Lehre von der Bewegung beschwor und unterschrieb, gesagt: »Und sie bewegt sich doch.« Das ist Legende, historisch unbeweisbar und ohne innere Wahrscheinlichkeit und doch unausrottbar im Volksmunde. Worauf beruht ihre Lebenskraft? Doch wohl darauf, dass Galilei ja bei den ganzen Prozessverhandlungen innerlich die Frage gestellt haben muss: »Was soll das alles? Ob ich, ob irgendein Mensch es nun behauptet oder nicht, ob politische, ob kirchliche Macht dafür ist oder dagegen, das ändert doch nichts an den Tatsachen! Wohl kann Macht deren Erkenntnis

8 Für Stark, siehe Mark Walker, *Nazi Science: Myth, Truth, and the German Atom Bomb*, New York 1995, S. 5-63; und Andreas Kleinert, »Lenard, Stark und die Kaiser-Wilhelm Gesellschaft. Auszüge aus der Korrespondenz der beiden Physiker zwischen 1933 und 1936«, *Physikalische Blätter*, 36, Nr. 2 (1980), S. 35-43.

eine Zeitlang aufhalten, aber einmal bricht diese doch durch.« Und so ist es ja auch gekommen. Der Siegeszug der Kopernikanischen Lehre war unaufhaltsam. Selbst die Kirche, die Galilei verdammt hat, hat den Widerstand schließlich, wenn auch erst 200 Jahre später, in aller Form aufgegeben.

Auch später gab es für die Wissenschaft manchmal schlechte Zeiten, so in Preußen unter dem sonst so verdienten Könige Friedrich Wilhelm I. Aber bei aller Bedrückung konnten sich ihre Vertreter aufrichten an der sieghaften Gewissheit, die sich ausspricht in dem schlichten Satze: Und sie bewegt sich doch!«

Max von Laue, »Ansprache bei
Eröffnung der Physikertagung in
Würzburg am 18. September 1933«⁹

»Wie hab' ich mich mit jeder Nachricht von Dir und über Dich gefreut. Ich hab nämlich immer gefühlt und gewusst, dass Du nicht nur ein Kopf sondern auch ein Kerl bist. Noch besser sieht man's in der Beleuchtung der Scheinwerfer, wenn's auch den Betroffenen in den Augen blendet. Wenn Du wünschst, dass ich etwas tue oder Du auch nur glaubst, dass ich es eventuell könnte, so lass mich's wissen. Ich kann mir denken, dass Dir die *species minorum gentium* nichts innerlich anhaben kann; und schließlich ist man ja keine Pflanze sondern ein bewegliches Biest.

Ich hab mich überm Teich behaglich eingerichtet, doch denke ich oft, dass der kleine Kreis von Menschen, der früher harmonisch verbunden war, wirklich einzigartig gewesen ist und in dieser menschlichen Sauberkeit kaum mehr von mir angetroffen werden wird. Dagegen gestehe ich offen, dass ich dem weiteren Kreise keine Träne nachweine; er war mehr amüsant für den unbeteiligten Zuschauer als liebenswert [...]

9 M. v. Laue (Berlin-Zehlendorf), »Ansprache bei Eröffnung der Physikertagung in Würzburg am 18. September 1933,« in: Max von Laue, Gesammelte Schriften und Vorträge, Band III, Braunschweig 1961, S. 61-62.

Wenn ich den lebhaften Wunsch habe, jemand noch einmal wieder zusehen, dann bist Du's.«

Albert Einstein an Max von Laue
(23. März 1934)¹⁰

Als Laue nach dem Krieg jetzt in der Lage war, offen seine Meinung zu sagen, hat er in einem Brief an Lise Meitner, die 1938 Deutschland verlassen musste, deutlich zum Ausdruck gebracht, dass er Einsteins Verhalten als »politisch« betrachte.

»Da sich Einstein fast 20 Jahre hindurch in Berlin politisch betätigt hatte (ich bin weit davon entfernt, dies als Vorwurf zu meinen), war sein Ausscheiden aus der Berliner Akademie unvermeidlich.«

Max von Laue an Lise Meitner
(1948)¹¹

2 ›Weisse Juden‹ in der Wissenschaft

Nachdem die überwiegende Mehrheit von jüdischen Naturwissenschaftlern aus Deutschland schon ausgewandert war, griffen die Befürworter der »deutschen Physik« »arische« Naturwissenschaftler an, die sich für die so genannte »jüdische Physik« – gemeint war die moderne Physik einschließlich Relativitätstheorie und Quantenmechanik – eingesetzt haben. Dank seiner Stellung im Dritten Reich war Stark in der Lage, Kampfschriften gegen die moderne Physik in der SS Wochenzeitung »Das Schwarze Korps« zu platzieren. Auf solche Art verhinderte er die Berufung Heisenbergs nach München.¹² Das war aber ein Pyrrhussieg für die »deutsche Physik«, weil Stark dadurch ein Verfahren in Gang setzte, das letztendlich sowohl Heisenberg als auch die moderne Physik innerhalb des nationalsozialistischen Staates rehabilitiert hat.

10 Albert Einstein an Max von Laue (23. März 1934) EP.

11 Dieter Hoffmann, Das Verhältnis der Akademie zu Republik und Diktatur. Max Planck als Sekretär, in: W. Fischer (Hrsg.), Die Preußische Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1914-1945, Berlin 2000, S. 53-85, hier 64.

12 Für Heisenberg, siehe David Cassidy, Werner Heisenberg – Leben und Werk, Heidelberg 1995.

»[...] Wie sicher sich die ›weissen Juden‹ in ihren Stellungen fühlen, beweist das Vorgehen des Professors für theoretische Physik in Leipzig, Professor Werner Heisenberg [...] 1933 erhielt Heisenberg den Nobelpreis zugleich mit den Einstein-Jüngern Schrödinger und Dirac – eine Demonstration des jüdisch beeinflussten Nobelkomitees gegen das nationalsozialistische Deutschland, die der »Auszeichnung« Ossietkys gleichzusetzen ist. Heisenberg stattete seinen Dank ab, indem er sich im August 1934 weigerte, einen Aufruf der deutschen Nobelpreisträger für den Führer und Reichskanzler zu unterzeichnen [...]

Heisenberg ist nur ein Beispiel für manche andere. Sie allesamt sind Statthalter des Judentums im deutschen Geistesleben, die ebenso verschwinden müssen wie die Juden selbst.«

[Johannes Stark,] »›Weisse Juden‹ in der Wissenschaft,« Das Schwarze Korps (15. Juli 1937)¹³

Ludwig Prandtl war ein international anerkannter Forscher für die Aerodynamik mit hervorragenden Verbindungen zur deutschen Industrie und Wehrmacht, und durch diese zum NS-Staat. Er war entsetzt, als man Wilhelm Müller, den er für unfähig hielt, statt Heisenberg auf den Münchner Lehrstuhl für theoretische Physik berief.

»Als ich [...] Ihr Tischnachbar war, brachte ich das Gespräch auf gewisse Schwierigkeiten, in die die deutschen Vertreter des Faches ›Theoretische Physik‹ durch ungerechtfertigte Angriffe [...] und erwähnte besonders die persönlichen Nöte des Herrn Heisenberg [...]

Die Schwierigkeiten [...] sind hauptsächlich dadurch hervorgerufen, dass eine an sich kleine Gruppe von Experimentalphysikern, die mit den Forschungen der Theoretiker nicht haben Schritt halten können, sich mit Heftigkeit gegen die neuere Entwicklung der theoretischen Physik aufgelehnt haben, in der Hauptsache aus dem Grunde, dass in dem Lehrgebäude der heutigen theoretischen Physik erhebliche Bestandteile stecken, die von nicht arischen Forschern stammen.

13 [Johannes Stark,] »›Weisse Juden‹ in der Wissenschaft,« Das Schwarze Korps (15. Juli 1937), S. 6.

Es ist zuzugeben, dass unter diesen nichtarischen Forschern auch solche von minderem Range waren, die mit der ihrer Rasse eigentümlichen Betriebsamkeit ihre Talmudware ausposaunten. Dass solche Erzeugnisse verschwinden, ist nur recht und billig, aber es gibt auch unter den Nichtariern Forscher allerersten Ranges, die mit heissem Bemühen die Wissenschaft zu fördern versuchen und sie in der Vergangenheit wirklich gefördert haben [...]

Bei Einstein muss man zwischen dem Menschen und dem Physiker unterscheiden. Der Physiker ist durch und durch erstklassig, aber der frühe Ruhm scheint ihm erheblich zu Kopf gestiegen zu sein, sodass er menschlich unleidlich geworden ist.

Die Wissenschaft kann aber nach diesen menschlichen Eigenschaften nicht fragen. Sie steht einfach vor der Tatsache, dass Gesetze entdeckt worden sind, die ihrerseits wieder den Anlass zu weiteren Entdeckungen geliefert haben, und die man nicht weglassen kann, ohne das auf ihnen weiter aufgebaute Lehrgebäude zu zerstören.«

Ludwig Prandtl an Heinrich
Himmler (12. Juli 1938)¹⁴

Himmler hat eine Ermittlung über Heisenberg befohlen, die in einem offiziellen und vertraulichen Bericht gipfelte.

»Heisenberg ist ein Mann von überragendem wissenschaftlichem Ruf. Seine Stärke liegt in einer guten Schule des Nachwuchses, zu denen von Weizsäcker, Flügge u.a. gehören [...]

Die menschliche und charakterliche Haltung Heisenbergs ist anständig. Heisenberg ist der Typ eines apolitischen Gelehrten. Wenn er auch jederzeit bereit ist, rückhaltlos für Deutschland einzutreten, ist er der Ansicht, dass man entweder ›als guter Deutscher geboren ist oder nicht‹ [...]

Im Laufe der Jahre hat sich Heisenberg jedoch mehr und mehr durch die Erfolge vom Nationalsozialismus überzeugen lassen und steht ihm heute positiv gegenüber. Er ist jedoch der Ansicht, dass für einen Hochschullehrer eine aktive politische Betätigung außer der gelegentlichen Teilnahme an Lagern und dergleichen nicht angebracht

14 Ludwig Prandtl an Heinrich Himmler (12. Juli 1938) Prandtl Nachlaß [PN], Archiv der Max-Planck Gesellschaft [MPG-Archiv].

ist. Die Überfremdung des deutschen Lebensraumes mit Juden lehnt auch Heisenberg heute grundsätzlich ab.«

Der SS Bericht (26. Mai 1939)¹⁵

Diese letzte, etwas unklare Behauptung war ohne Zweifel unwahr. Wahrscheinlicher ist, dass die SS Beamten, die diesen Bericht geschrieben haben, ein positives Urteil über Heisenberg liefern wollten. Himmler, der sich als Förderer der Wissenschaft verstanden hat, schrieb Heisenberg persönlich.

»Ich freue mich, Ihnen mitteilen zu können, dass ich den Angriff des Schwarzen Korps durch seinen [Johannes Starks] Artikel nicht bilige, und dass ich unterbunden habe, dass ein weiterer Angriff gegen Sie erfolgt[...]

P.S. Ich halte es allerdings für richtig, wenn Sie in Zukunft die Anerkennung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse von der menschlichen und politischen Haltung des Forschers klar vor Ihren Hörern trennen.«

Heinrich Himmler an Werner
Heisenberg (21. Juli 1938)¹⁶

Himmler war direkter, als er Reinhard Heydrich, den zweiten Mann in der SS, auf den Fall Heisenberg aufmerksam machte.

»[...] da ich ebenfalls glaube, dass Heisenberg anständig ist, und wir es uns nicht leisten können, diesen Mann, der verhältnismäßig jung ist und Nachwuchs heranbringen kann, zu verlieren oder tot zu machen.«

Heinrich Himmler an Reinhard
Heydrich (21. Juli 1938)¹⁷

Heisenberg war mit den Anweisungen einverstanden.

15 Heinrich Himmler an Rudolf Mentzel (REM) (26 Mai 1939) REM 2943, 370-372 Bundesarchiv, Abteilung Potsdam [BAP].

16 Heinrich Himmler an Werner Heisenberg (21. Juli 1938) Samuel Goudsmit Papers [SGP], American Institute of Physics, Center for the History of Physics, College Park, Maryland USA.

17 Heinrich Himmler an Reinhard Heydrich (21. Juli 1938) SGP.

»Den Rat Himmlers habe ich eigentlich, auch ohne dass er mir gegeben wurde, in Privatgesprächen etc. schon von selbst befolgt, da mir Einsteins Haltung der Öffentlichkeit gegenüber niemals sympathisch war. In Vorträgen habe ich allerdings immer über rein wissenschaftliche Fragen gesprochen und daher keine Gelegenheit gehabt, über die Person Einsteins (oder über die Starks) etwas zu sagen. Aber ich werde den Rat Himmlers gern dahingehend befolgen, dass ich dann, wenn ich über die Relativitätstheorie spreche, gleichzeitig betone, dass ich politisch und »weltanschaulich« eine andere Stellung einnehme, als Einstein – was Herr Himmler übrigens schon daraus sehen könnte, dass ich nicht die Absicht hatte oder habe, Deutschland zu verlassen.«

Werner Heisenberg an Ludwig
Prandtl (8. März 1938)¹⁸

»Vor einigen Jahren ließen Sie mir [...] von ihrem Stabe mitteilen, dass Sie eine öffentliche Wiederherstellung meiner Ehre [...] wünschten [...] Im Mai des letzten Jahres bin ich an das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin-Dahlem berufen worden, und ich danke Ihnen für die damit verbundene Wiederherstellung meiner Ehre.«

Werner Heisenberg an Heinrich
Himmler (4. Februar 1943)¹⁹

Ohne Zweifel hat Heisenberg diese Berufung verdient, jedoch konnte er sie nur bekommen, weil er die Unterstützung der SS auch besaß. Himmler hat auch angeordnet, dass Heisenberg einen Aufsatz im Hausjournal der »deutschen Physik« veröffentlichen durfte. In diesem Aufsatz machte Heisenberg eine Aussage über Einstein und andere Bemerkungen im Geiste der Zeit.

»Eine Vorbemerkung muss hier noch Platz finden: eine physikalische Theorie macht Aussagen über die Wirklichkeit, das ist ihr einziger Inhalt. Die Wirklichkeit verläuft unabhängig von den Theorien,

18 Heisenberg an Prandtl (8. März 1938) IX 4 1935-1939 MPG-Archiv.

19 Heisenberg an Himmler (4. Februar 1943) Heisenberg Nachlass [HN], Max Planck Institut für Physik und Astrophysik, München.

wie diese auch entstanden sein mögen. Amerika wäre auch entdeckt worden, wenn Columbus nie gelebt hätte; die Theorie der elektrischen Erscheinungen wäre auch ohne Maxwell, die elektrischen Wellen wären ohne Hertz gefunden worden; denn an den Tatsachen konnten die Entdecker ja gar nichts ändern. Ebenso wäre die Relativitätstheorie zweifellos auch ohne Einstein entstanden; gerade hier kann man im einzelnen zeigen, dass auch andere Gelehrte schon ihr Denken in die gleiche Richtung gelenkt hatten; durch die Arbeiten von Voigt, Lorentz und Poincaré stand man schon ganz dicht vor der vollständigen Formulierung der speziellen Relativitätstheorie. Bei der Frage nach der Richtigkeit einer Theorie wird man also die Entdeckungsgeschichte am besten völlig beiseite lassen [...]

Es wird nach dem bisher Gesagten auch in Zukunft noch lange Zeit Physiker und Techniker geben, denen die modernen Theorien nicht überzeugend sind und die ihre experimentelle Widerlegung erwarten. Diese werden die Erwartung auch meistens mit dem Satz begründen, dass es sich bei Quantentheorie und Relativitätstheorie und den betreffenden Erfahrungen doch noch um weitgehend ungeklärte Zusammenhänge handele. Dies ist der natürliche und richtige Entwicklungsgang unserer Wissenschaft schon von jeher gewesen. Aber die vorwärts schreitende Physik besitzt angesichts der Erfolge der modernen Theorien doch schon jetzt das Recht, diesen Kritikern die Beweislast aufzubürden, d. h. nur experimentell gesicherte Widersprüche zu diesen Theorien, nicht aber nur philosophische Abhandlungen oder Kampfschriften als Einwände gelten zu lassen. An dieser entscheidenden Stelle muss es nun wirklich heißen: Das Experiment an die Front!«

Werner Heisenberg, »Die Bewertung der ›modernen theoretischen Physik,‹« Zeitschrift für die gesamte Naturwissenschaft, 9 (1943), 201-212²⁰

20 Werner Heisenberg, »Die Bewertung der ›modernen theoretischen Physik,‹« Zeitschrift für die gesamte Naturwissenschaft, 9 (1943), S. 201-212.

Nach dem Krieg musste Stark sich vor dem Entnazifizierungsgericht verteidigen.²¹ Ursprünglich als Hauptbeschuldigter verurteilt, hat er Einspruch erhoben. Die Berufungskammer bat Heisenberg um eine Stellungnahme.

»[...] Der von einer kleinen Clique von Nationalsozialisten geführte Kampf gegen die Relativitätstheorie geht fast ausschließlich auf das Wirken der beiden Leute Stark und Lenard zurück, denen es damals gelungen war, haltlose jüngere Parteileute zu Angriffen gegen ›verkalkte und verjüdete Physiker‹ zu verführen.

Ob bei Stark der Antisemitismus der eigentliche Grund für sein Verhalten war, scheint mir zweifelhaft. [...] Ich vermute eher, dass Stark relativ früh in wissenschaftlichem Gegensatz zu einer Reihe von tüchtigen Physikern der damaligen Zeit geraten ist und dass seine Verbitterung darüber, dass er nach seiner Ansicht nicht genügend anerkannt war, zu seinem völlig indiskutablen Verhalten geführt hat.«

Werner Heisenberg an die
Berufungskammer München
(24. Mai 1949)²²

Kontrolle

Das deutsche »Uranprojekt« während des zweiten Weltkrieges wirft eine sehr umstrittene Frage auf: versuchten Heisenberg, Carl Friedrich von Weizsäcker, Otto Hahn und ihre Kollegen, Kernwaffen für Hitler herzustellen?²³ 1940 hat Weizsäcker einen Bericht für das Heereswaffenamt erstellt und darin mitgeteilt, dass ein Reaktor, der in Betrieb gegangen ist, ein transuranisches Element – was man jetzt Plutonium

21 Andreas Kleinert, »Das Spruchkammerverfahren gegen Johannes Stark«, Sudhoffs Archiv, 67 (1983), S. 13-24.

22 Werner Heisenberg an die Berufungskammer München (24. Mai 1949) HN.

23 Siehe Mark Walker, Die Uranmaschine. Mythos und Wirklichkeit der deutschen Atombombe, Berlin 1990; Mark Walker, »Selbstreflexionen deutscher Atomphysiker. Die Farm Hall-Protokolle und die Entstehung neuer Legenden um die ›deutsche Atombombe‹«, Vierteljahrshefte für Zeitgeschichte, 41 (1993), S. 519-42; Mark Walker, »Eine Waffenschmiede? Kernwaffen- und Reaktorforschung am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik«, in Rüdiger

nennt – erzeugen würde, das man als einen Kernsprengstoff einsetzen könnte. Ein Jahr später meldete er dafür ein Patent an.

»Die Erzeugung des Elements 94 [Plutonium] in praktisch brauchbarer Menge ist am besten in der ›Uranmaschine‹ [Kernreaktor] möglich [...] Ganz besonders vorteilhaft ist es – und dies bildet den Hauptgewinn der Erfindung – dass das entstandene Element 94 leicht chemisch [...] von dem Uran getrennt und rein dargestellt werden kann [...]

Verfahren zur explosiven Erzeugung von Energie und Neutronen aus der Spaltung des Elements 94, dadurch gekennzeichnet, dass das [...] hergestellte Element 94 in solcher Menge an einen Ort gebracht wird, z. B. in eine Bombe, dass die bei einer Spaltung entstehenden Neutronen in der überwiegenden Mehrzahl zur Anregung neuer Spaltungen verbraucht werden und nicht die Substanz verlassen [...]

Carl Friedrich von Weizsäckers 1941
Patent²⁴

Weizsäcker hat sichergestellt, dass das Heereswaffenamt die militärische Bedeutung seiner Arbeit erkennt.

»Nach den bisherigen Versuchen kommen zwei Arten energieverzeugender Stoffe für die praktische Verwendung in Betracht:«

1. Uran in seiner natürlichen Zusammensetzung (Gemisch eines wirksamen Isotops mit einem unwirksamen).
2. Ein aus Uran zu gewinnender hochkonzentrierter wirksamer Stoff (reines Isotop U235 oder ein Folgeprodukt höherer Ordnungszahl [Plutonium]).

Hachtmann (Hrsg.), Ergebnisse. Vorabdrucke aus dem Forschungsprogramm Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus, No. 26 (Berlin 2005), auch bei <http://www.xlab-goettingen.de/staticsite/staticsite.php?menuid=749&topmenu=747&keepmenu=inactive>; siehe auch Rainer Karlsch, Hitlers Bombe, München 2005; für andere Interpretationen von Heisenbergs Rolle beim Uranprojekt, siehe Thomas Powers, Heisenbergs Krieg, Hamburg 1993 und Paul Lawrence Rose, Heisenberg und das Atombombenprojekt der Nazis, Zürich 2001.

24 Carl Friedrich von Weizsäcker, »Energieerzeugung aus dem Uranisotop der Masse 238 und anderen schweren Elementen (Herstellung und Verwendung des Elements 94)« KWIfP 7H Pu 6-11 MPG-Archiv.

Die Verwendung als Raketenantrieb ist grundsätzlich möglich, stößt aber vorläufig noch auf praktische Schwierigkeiten. Der Antrieb könnte geleistet werden:

3. durch den Rückstoß der Atomkernbruchstücke selbst
4. durch vermittels der erzeugten Energie erhitzte Substanzen [...]

Die Verwendung als Raketenantrieb bleibt daher Sache zukünftiger Entwicklung. Vordringlich ist nach dem derzeitigen Stand der Versuche die Entwicklung zweier anderer Verwendungsweisen: als Wärmemaschine und als Sprengstoff.

Carl Friedrich von Weizsäckers 1941
Diskussion mit Dr. Kurt Diebner
(Heereswaffenamt)²⁵

Während des gleichen Jahres reiste Weizsäcker in das besetzte Kopenhagen, um Vorträge zu halten und naturwissenschaftliche Nachrichten zu sammeln.

»Ich konnte Kenntnis nehmen von den experimentellen und theoretischen Arbeiten des Instituts für theoretische Physik (Prof. Bohr), die im letzten Jahr ausgeführt worden sind. Es handelt sich um Untersuchungen der Spaltung von Uran und Thorium durch schnelle Neutronen und Deutronen. Von den Arbeiten, die auch für unsere hiesigen Untersuchungen von großem Interesse sind, habe ich Sonderdrucke und Manuskripte mitgebracht.

Über die Frage der technischen Energiegewinnung durch die Uran-spaltung wird in Kopenhagen nicht gearbeitet. Es ist dort bekannt, dass in Amerika insbesondere von Fermi Untersuchungen über diese Fragen eingeleitet worden sind; doch sind seit der Dauer des Krieges keine klaren Nachrichten aus Amerika mehr eingelaufen. Professor Bohr wusste offensichtlich nicht, dass bei uns Arbeiten über diese Frage im Gange sind; selbstverständlich habe ich ihn in seiner Ansicht bestärkt. Das Gespräch wurde von ihm selbst auf diesen Gegenstand gebracht [...]

25 Carl Friedrich von Weizsäcker, »Kurzer Bericht über die eventuelle praktische Auswirkung der Uranuntersuchungen auf Grund einer Rücksprache mit Dr. Diebner« KWIfP 56 170-172 MPG-Archiv.

Die amerikanische Zeitschrift *Physical Review* war in Kopenhagen bis zum Heft vom 15. Januar 1941 einschließlich vorhanden. Von den wichtigsten Arbeiten habe ich Photographien mitgebracht. Es wurde verabredet, dass die Hefte von der Deutschen Gesandtschaft laufend für uns photokopiert werden.«

Carl Friedrich von Weizsäckers
Bericht über seinen Besuch in
Kopenhagen März 1941²⁶

Die Reise, die Heisenberg und Weizsäcker im September 1941 nach Kopenhagen unternommen haben (und die unten diskutiert wird), der deutsche Einmarsch in die Sowjetunion während des Sommers und die Verschlechterung der Kriegslage für Deutschland im Herbst haben offensichtlich diese Naturwissenschaftler beeinflusst und bei ihnen den Zwiespalt in Bezug auf die ›Uranarbeit‹ verstärkt. Man kann diese Entwicklung bei einer Reihe von vier Forschungsberichten von Heisenberg sehen. Der erste Bericht wurde spät im November eingereicht, zu einer Zeit, als der Blitzkrieg zum Stillstand gekommen war und sich die Spannungen zwischen Japan und den USA erhöhten, die bald zum Angriff auf Pearl Harbor durch die Japaner zur Kriegserklärung Deutschlands gegen die USA führten. Kurz danach hat das Heereswaffenamt Heisenberg und die anderen Institutsdirektoren zu einer Besprechung darüber aufgefordert, wie oder ob das Uranprojekt weitergeführt werden sollte.

»Die Arbeiten zur Energieerzeugung in der Uranmaschine haben im Augenblick in physikalischer Hinsicht ein verhältnismäßig klares Studium erreicht. Es unterliegt keinem Zweifel mehr, dass grundsätzlich eine selbsttätige Anlage gebaut werden kann. Ohne Zweifel muss dieses Hauptziel möglichst rasch erreicht werden [...] Als notwendig können heute nur die Arbeiten gelten, die unmittelbar dazu beitragen, dass wenigstens eine selbsttätige Anlage in kürzester Zeit entsteht; unter diesen sind vordringlich diejenigen, die das Tempo der Arbeiten bestimmen [...]

26 Carl Friedrich von Weizsäcker, »Energieerzeugung aus dem Uranisotop der Masse 238 und anderen schweren Elementen (Herstellung und Verwendung des Elements 94)« KWIfP 7H Pu 6-11 MPG-Archiv.

Notwendig ist [...] ein gewisser Bestand arbeitsfähiger Wissenschaftler. Auch bei starker Einschränkung der Arbeiten müssten wohl jedenfalls die zwei kernphysikalischen Institute voll arbeitsfähig bleiben, welche die bisherige Entwicklung vor allem getragen haben (KWI für medizinische Forschung, Abt. Physik, in Heidelberg und KWI für Physik in Berlin-Dahlem).«

Werner Heisenberg, »Zur Durchführung der Arbeiten an der Uranmaschine«
(27. November 1941)²⁷

Wenn die Behörden ihr Interesse für Uranforschung verloren hätten, hätten die Projektwissenschaftler auch ihre u. k. Stellungen verloren. In der Tat wurden im Januar 1942 sowohl Weizsäcker als auch der in Hamburg arbeitende Physiko-Chemiker Paul Harteck zum Wehrdienst einberufen. Nur die hervorragende persönliche Verbindung, die Heisenberg und der in Leipzig arbeitende Physiko-Chemiker Karl Friedrich Bonhoeffer mit höheren Stellen der Wehrmacht hatten, ermöglichten eine Aufhebung der Einberufung.

Die Beamten vom Heereswaffenamt haben entschieden, dass man Kernwaffen nicht vor dem Ende des Krieges herstellen konnte, so dass das Projekt einer Zivilbehörde zugeordnet werden sollte. Der Reichsforschungsrat hat die Forschung übernommen. Spät im Februar haben Projektwissenschaftler eine populäre Vortragsreihe vor dem Reichsforschungsrat veranstaltet. Nach dem Krieg bemerkte Heisenberg, dass man diese Vorträge »[...] auf das Verständnisniveau eines damaligen Reichsministers zugeschnitten [...]« hat.²⁸

»[...] Wenn es gelingen würde, sämtliche Atomkerne von z. B. 1 Tonne Uran durch Spaltung umzuwandeln, so würde dabei die ungeheure Energiemenge von etwa 15 Billionen Kilokalorien frei. Dass bei Atomkern-Umwandlungen so hohe Energiebeträge umgesetzt werden, war seit langem bekannt, vor der Entdeckung der Spaltung bestand jedoch keine Aussicht, Kernumwandlungen an größeren Substanzmengen durchzuführen [...]

27 Werner Heisenberg, »Zur Durchführung der Arbeiten an der Uranmaschine« (27 November 1941) KWIfP 56 84-91 MPG-Archiv.

28 Werner Heisenberg an Samuel Goudsmit (5. Januar 1948) SGP.

Die Tatsache, dass beim Spaltungsprozess mehrere Neutronen ausgeschleudert werden, eröffnet dagegen die Aussicht, die Umwandlung großer Substanzmengen durch eine Kettenreaktion zu erzwingen: Die bei der Spaltung ausgeschleuderten Neutronen sollen ihrerseits wieder andere Urankerne spalten, hierdurch entstehen wieder neue Neutronen usw.; durch mehrfache Wiederholung dieses Prozesses setzt eine sich immer weiter steigende Vermehrung der Neutronenzahl ein, die erst aufhört, wenn ein großer Teil der Substanz umgewandelt ist [...]

Das Verhalten der Neutronen im Uran kann ja mit dem Verhalten einer Bevölkerungsdichte verglichen werden, wobei der Spaltungsprozess das Analogon zur Eheschließung und der Einfangprozess die Analogie zum Tode dargestellt. Im gewöhnlichen Uran überwiegt die Sterbeziffer bei weitem die Geburtszahl, sodass eine vorhandene Bevölkerung stets nach kurzer Zeit aussterben muss.

Eine Verbesserung dieser Sachlage ist offenbar nur möglich, wenn es gelingt, entweder: 1. die Zahl der Geburten pro Eheschließung zu erhöhen; oder: 2. die Zahl der Eheschließungen zu steigern oder: 3. die Sterbewahrscheinlichkeit herabzusetzen.

Die Möglichkeit 1. besteht [...] nicht [...] Eine Erhöhung der Anzahl der Spaltungen 2. lässt sich erreichen, wenn man das auch bei kleinen Energien spaltbare aber seltenere Isotop U235 anreichert, wenn es etwa gelänge, das Isotop U235 sogar rein herzustellen, so entstünden die Verhältnisse, die auf der rechten Seite der Abb. 1 vorgestellt sind.

Jedes Neutron würde nach einem oder mehreren Zusammenstößen eine weitere Spaltung bewirken, wenn es nicht vorher etwa durch die Oberfläche austritt. Die Sterbewahrscheinlichkeit durch Einfang ist hier gegenüber der Vermehrungswahrscheinlichkeit verschwindend gering. Wenn man also nur eine so große Menge von U235 anhäuft, dass der Neutronenverlust durch die Oberfläche klein bleibt gegenüber der Vermehrung im Inneren, so wird sich die Neutronenzahl in kürzester Zeit ungeheuer vermehren und die ganze Spaltungsenergie von 15 Billionen Kalorien pro Tonne werden in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde frei. Das reine Isotop U235 stellt also zweifellos einen Sprengstoff von ganz unvorstellbarer Wirkung dar. Allerdings ist dieser Sprengstoff sehr schwer zu gewinnen.

Ein großer Teil der Arbeit der Arbeitsgemeinschaft des Herreswaffenamtes ist dem Problem der Anreicherung bzw. der Reindarstellung des Isotops U235 gewidmet. Auch die amerikanische Forschung scheint diese Arbeitsrichtung mit besonderem Nachdruck zu betreiben [...]

Man kommt damit zu einer (Uran-)Maschine, die etwa zum Heizen einer Dampfturbine geeignet ist und die einer solchen Wärmekraftmaschine ihre ganzen, großen Energien in Lauf der Zeit zur Verfügung stellen kann. Man kann daher an die praktische Verwendung solcher Maschinen in Fahrzeugen bez. in Schiffen denken, die durch den großen Energievorrat einer relativ kleinen Uranmenge einen riesigen Aktionsradius bekommen würden. Dass die Maschine keinen Sauerstoff verbrennt, wäre bei der Verwendung in U-Booten ein besonderer Vorteil.

Sobald eine solche Maschine einmal in Betrieb ist, erhält auch nach einem Gedanken von v. Weizsäcker die Frage nach der Gewinnung des Sprengstoffs eine neue Wendung. Bei der Umwandlung des Urans in der Maschine entsteht nämlich eine neue Substanz, (Element der Ordnungszahl 94), die höchstwahrscheinlich ebenso wie reines U235 ein Sprengstoff der gleichen unvorstellbaren Wirkung ist. Diese Substanz lässt sich aber viel leichter als U235 aus dem Uran gewinnen, da sie chemisch von Uran getrennt werden kann [...]

Die bisherigen Ergebnisse lassen sich in folgender Weise zusammenfassen: 1. die Energiegewinnung aus der Uranspaltung ist zweifellos möglich, wenn die Anreicherung des Isotops U235 gelingt. Die Reindarstellung von U235 würde zu einem Sprengstoff von unvorstellbarer Wirkung führen.

2. Auch gewöhnliches Uran kann in einer Schichtung mit schwerem Wasser zur Energiegewinnung ausgenutzt werden. Eine Schichtenanordnung aus diesen Stoffen kann ihren großen Energievorrat im Lauf der Zeit auf eine Wärmekraftmaschine übertragen. Sie gibt also ein Mittel in die Hand, sehr große technisch verwertbare Energiemengen in relativ kleinen Substanzmengen aufzubewahren. Auch die Maschine im Betrieb kann zur Gewinnung eines ungeheuer starken Sprengstoffs führen; sie verspricht darüber hinaus eine Menge von

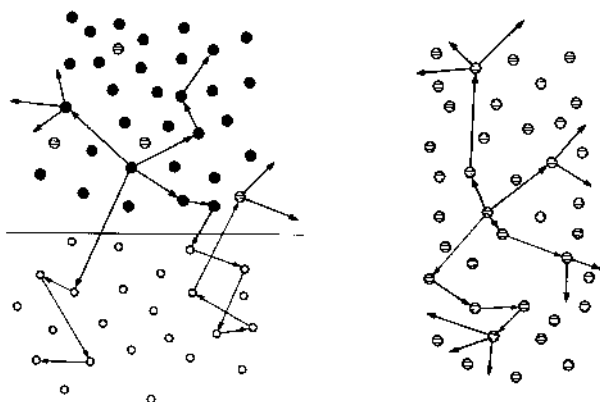


Abbildung 1

anderen wissenschaftlich und technisch wichtigen Anwendungen, über die jedoch hier nicht berichtet werden sollte.«

Werner Heisenberg, »Die theoretischen Grundlagen für die Energiegewinnung aus der Uranspaltung« (26. Februar 1942)²⁹

Nach fünf Monaten hatte sich die Lage drastisch geändert. Der Reichsforschungsrat war großzügig im Bezug auf die Förderung für das Projekt. Außerdem hat Albert Speer, Hitlers neuer Rüstungsminister, die Forschung im allgemeinen und vor allem Heisenberg begeistert unterstützt. Im Juni 1942 hielt Heisenberg einen anderen, bezeichnenderweise abweichenden Vortrag in Berliner Harnackhaus vor Speer und anderen Zuhörern.

»[...] Besonders in Amerika war das Interesse für diese neueste Entwicklung [Kernspaltung] außerordentlich groß, wenige Tage nach der Entdeckung brachte der amerikanische Rundfunk ausführliche Berichte und schon ein halbes Jahr später waren in Amerika eine große Anzahl wissenschaftlicher Arbeiten über diesen Gegenstand erschienen [...] [...] nach einer Reihe wichtiger Vorarbeiten [...]

29 Werner Heisenberg, »Die theoretischen Grundlagen für die Energiegewinnung aus der Uranspaltung« (26. Februar 1942) SGP.

ist es schließlich gelungen, eine kleine Versuchsanordnung aus etwa 150 l D₂O und 600 kg Uran-Metall zu bauen, in der eine eingestrahlte Neutronenmenge tatsächlich vermehrt wird und Energie produziert. Eine Vergrößerung dieser [...] Versuchsanordnung auf den drei- bis sechsfachen Durchmesser würde nach den vorliegenden Ergebnissen schon zu einem Uran-Brenner führen, d. h. zu einer Anordnung, die spontan ohne äußere Einstrahlung große Mengen Energie liefern kann [...]

Ich möchte an dieser Stelle erwähnen, dass es nach den bisherigen positiven Ergebnissen nicht ausgeschlossen erscheint, dass man nach Herstellung des Uranbrenners auf einem von v. Weizsäcker angegebenen Weg auch eines Tages zu Explosivstoffen kommen kann, die alle bisherigen um das Millionenfache an Wirksamkeit übertreffen.

Die Zeit bis zur technischen Entwicklung eines solchen Brenners wird im Augenblick weitgehend durch Materialbeschaffungsfragen bestimmt, insbesondere durch die Produktion des schweren Wassers. Aber auch abgesehen von den Materialfragen muss noch viel wissenschaftliche Entwicklungsarbeit geleistet werden.

Selbst wenn man die Schwierigkeiten einer solchen Entwicklungsarbeit in Rechnung setzt, wird man aber darauf gefasst sein müssen, dass hier in den nächsten Jahren ein Neuland von der allergrößten Bedeutung für die Technik erschlossen werden kann. Da wir wissen, dass in Amerika an diesem Problem mit dem Einsatz einer großen Reihe der besten Laboratorien gearbeitet wird, kann man in Deutschland kaum auf die Verfolgung dieser Fragen verzichten. Selbst wenn man daran denkt, dass solche Entwicklungen meist lange Zeit brauchen, muss man dann, wenn der Krieg mit Amerika noch mehrere Jahre dauern sollte, mit der Möglichkeit rechnen, dass die technische Verwertung der Atomkernenergien eines Tages plötzlich eine kriegsentscheidende Rolle spielen kann.«

Werner Heisenberg, »Die Arbeiten am Uranproblem« (4. Juni 1942)³⁰

30 Werner Heisenberg, »Die Arbeiten am Uranproblem« (4. Juni 1942) KWIfP 56 174-178 MPG-Archiv.

Im Gegensatz zu Michael Frayns Spekulationen in seinem Stück *Kopenhagen*³¹ hat also Heisenberg auch Speer die Bedeutung von Plutonium als Kernsprengstoff mitgeteilt. Jedoch im Vergleich zum Februar in einer sehr zurückhaltenden Weise. Jetzt liegt die Hauptbetonung und Begründung Heisenbergs beim Wettbewerb mit Amerika.

Fast ein Jahr später wurde Heisenberg noch einmal zum Vortrag über Uran, diesmal vor die Reichsluftfahrt Akademie, eingeladen.

»Wenn man viele derartige [Uran-]Brenner herstellen kann, so kann man an ihre Anwendung zum Antrieb von Wasserkraftmaschinen und an ihre Benutzung für Schiffe und an derartige Fahrzeuge denken, bei denen es darauf ankommt, eine möglichst große Energiemenge in einem kleinen Raum zu speichern. Dass bis zur Erreichung dieses Ziels auch noch viele rein technische Probleme zu lösen sind, die mit der Frage der Wärmeübertragung, der Korrosionsfestigkeit der benutzten Metalle usw. zusammenhängen, braucht wohl nicht erst erwähnt zu werden [...]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass hier der erste Schritt zu einer sehr wichtigen technischen Entwicklung getan ist, und dass nach den vorliegenden Experimenten kaum mehr an der Möglichkeit gezweifelt werden kann, die Atomkern-Energien für technische Zwecke in großem Umfange freizumachen. Andererseits stößt die praktische Durchführung dieser Entwicklung in der gespannten Wirtschaftslage des Krieges naturgemäß auf große Schwierigkeiten.«

Werner Heisenberg, »Die
Energiegewinnung aus der
Atomkernspaltung« (6. Mai 1943)³²

Bemerkenswerterweise sagte Heisenberg nichts über Kernsprengstoffe oder -waffen.

Nach dem Krieg wurden zehn deutsche Naturwissenschaftler bei Farm Hall, einem englischen Landhaus, interniert, wo mit versteckten Mikrofonen ihre Besprechungen aufgenommen wurden. Mit Ausnahme von Laue nahmen alle an der Uranforschung teil. Weizsäcker

31 Michael Frayn, *Kopenhagen*. Stück in zwei Akten, 3. erweiterte Auflage (Göttingen 2003), S. 72.

32 Werner Heisenberg, »Die Energiegewinnung aus der Atomkernspaltung,« G-217 (6. Mai 1943) Archiv des Deutschen Museum [ADM] München.

hat diese Gelegenheit wahrgenommen, um eine Erklärung abzugeben, warum er und seine Kollegen nicht die ersten waren, die den Bau der Atombombe vorangetrieben haben wollten.

»Ich glaube, es ist uns nicht gelungen, weil alle Physiker im Grunde gar nicht wollten, dass es gelang. Wenn wir alle gewollt hätten, dass Deutschland den Krieg gewinnt, hätte es uns gelingen können.«

Carl Friedrich von Weizsäcker in
Farm Hall (1945)³³

Nachdem er nach Deutschland zurückgekehrt war, veröffentlichte Heisenberg als Antwort auf die Kritik seines amerikanischen (und ehemaligen holländischen) Kollegen Samuel Goudsmit,³⁴ seine eigene Darstellung vom deutschen Uranprojekt. Vor allem hat er »Kontrolle« als Begründung und Rechtfertigung eingeführt.

»Die deutschen Physiker hatten von vornherein bewusst darauf hingearbeitet, die Kontrolle über das Vorhaben in der Hand zu behalten, und sie haben den Einfluss, den sie als Sachverständige hatten, darauf verwendet, die Arbeiten in dem in diesem Bericht geschilderten Sinne zu lenken. Die äußeren Umstände haben ihnen die schwere Entscheidung, ob sie Atombomben herstellen sollten, aus der Hand genommen. Die Entwicklung von 1942 lenkte die Arbeiten von selbst auf das Problem, die Atomenergie für Maschinen technisch nutzbar zu machen. Diese Aufgabe erschien den Physikern wichtig genug [...]«

Werner Heisenberg, »Über die
Arbeiten zur technischen
Ausnutzung der Atomkernenergie in
Deutschland« (1946)³⁵

33 Dieter Hoffmann (Hrsg.), Operation Epsilon. Die Farm-Hall-Protokolle oder Die Angst der Alliierten vor der deutschen Atombombe (Berlin 1993), 153.

34 Samuel Goudsmit, »Secrecy or Science?« Science Illustrated, 1 (1946), S. 97-99.

35 Werner Heisenberg, »Über die Arbeiten zur technischen Ausnutzung der Atomkernenergie in Deutschland,« Die Naturwissenschaften, 33 (1946), S. 325-329.

Jahrzehnte später hat Weizsäcker zwei Interviews gegeben, in denen er seine eigenen Handlungen und Motivation kritisiert.

»Ich hatte einfach überlegt, dass es möglich ist, mit den Folgeprodukten des Urans, die man heute als Plutonium bezeichnet, leicht eine Spaltung vorzunehmen [...] Dann war die Frage: Soll ich das für mich behalten oder darüber einen Bericht schreiben? Ich habe einen Bericht geschrieben, den habe ich dann auch abgeliefert.

Wenn Sie mich jetzt fragen, was für einen Grund das hatte, dann antworte ich: Ich dachte, wenn der Bau einer Bombe auf diese Weise möglich ist, dann werde ich einer sein, mit dem man darüber reden muss. Und dann werde ich zusehen, dass ich einen Weg zu den wirklichen Entscheidungsträgern finde, um mit denen etwas zu bereden, was diese unteren Burschen sowieso nicht verstehen.«

›Was ich damals gemacht habe, gehört zu denjenigen Handlungen meines Lebens, die ich nachträglich nicht noch einmal wiederholen würde. Ich habe falsch gehandelt. Das Technische interessierte mich überhaupt nicht, wissenschaftlich fand ich andere Sachen viel interessanter. Aber ich fand, Politik ist wichtig. Und ich hatte die Vorstellung, dass ich politischen Einfluss gewinnen könnte, wenn ich jemand wäre, mit dem selbst Adolf Hitler reden musste [...]

Ich habe geglaubt – das war mein grosser Irrtum –, es könnte ja sein, dass man den Hitler zu einer Politik des Friedens bewegen kann. Dazu können Sie natürlich sagen, ich sei verrückt gewesen. Und ich bin bereit zuzugeben: Ich war verrückt [...]

Ein Interview mit Carl Friedrich von Weizsäcker (1991)³⁶

Kopenhagen

Michael Frayn hat den Besuch Heisenbergs und Weizsäckers im September 1941 im besetzten Kopenhagen popularisiert und dramatisiert. Der historische Kontext dieses Besuches schliesst den deutschen Blitzkrieg gegen die Sowjetunion (der damals sehr erfolgreich schien), den jüngsten Erfolg mit Kernreaktorexperimenten und Weizsäckers Reise

36 Hoffmann, Operation Epsilon, S. 337-338; Interview mit Carl Friedrich von Weizsäcker, Der Spiegel, 17 (22. April 1991), S. 227-238.

nach Dänemark im März ein. Deutsche Propagandabeamte in Kopenhagen haben den Auftritt Weizsäckers gelobt.

»Dem in dänischer Sprache gehaltenen, sehr gut besuchten Vortrag von v. Weizsäcker in der Physikalischen und Astronomischen Gesellschaft über das Thema ›Ist die Welt in Zeit und Raum unendlich?‹ folgten die Zuhörer mit großem, zustimmendem Interesse.

Bei dem zweiten öffentlichen Vortrag in der Dänisch-Deutschen Gesellschaft sprach Dr. von Weizsäcker vor einem ausgesuchten dänischen und deutschen Zuhörerkreis über dasselbe Thema. Er wusste das schwere Thema so anregend zu gestalten, dass der breite Kreis der Zuhörer, unter denen sich der Befehlshaber der deutschen Truppen in Dänemark befand, seinen Ausführungen ohne weiteres folgen konnte. Zum Schluss wurde der Vortragende mit reichem Beifall für seine ruhigen und sachlichen Ausführungen belohnt.

Schließlich hielt Dr. von Weizsäcker auf Einladung des Instituts für Theoretische Physik vor einem rein wissenschaftlichen Zuhörerkreis einen Vortrag über das Thema: ›Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants.‹ Nach diesem Vortrag fand eine lebhaftete Aussprache unter den anwesenden Wissenschaftlern statt [...]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vorträge von Dr. von Weizsäcker sowohl vor dem Laienpublikum als auch in den rein wissenschaftlichen dänischen Kreisen außerordentlich gut gewirkt haben. Es wird deshalb erwogen, Dr. von Weizsäcker im kommenden Herbst, zusammen mit Professor Dr. Heisenberg, Leipzig, im Rahmen des neu gegründeten deutschen Wissenschaftlichen Institutes zu einer Arbeitswoche auf dem Gebiete der Mathematik, Astronomie und theoretischen Physik nach Kopenhagen einzuladen [...]

Der Bevollmächtigte des Deutschen
Reiches an das Auswärtige Amt in
Berlin (27. März 1941)³⁷

Weizsäcker hat persönlich mitgeholfen, die Septemberreise zu arrangieren.

37 Der Bevollmächtigte des Deutschen Reiches an das Auswärtige Amt in Berlin (27. März 1941) REM 2943, 524-525 BAP.

»Auf die Teilnahme Heisenbergs habe ich deshalb Wert gelegt, weil er einerseits als führender deutscher theoretischer Physiker an kulturpropagandistischer Wirkung schwerlich übertroffen werden kann und andererseits durch mehrjährigen Aufenthalt in Dänemark gerade für Kopenhagen wohl besonders geeignet ist und die dänische Sprache vollständig beherrscht.«

Carl Friedrich von Weizsäcker an den DAAD (22. Juli 1941)³⁸

Während seines Besuches schrieb Heisenberg einen Brief an seine Frau, den er aber bei sich behielt, bis er zurück über die deutsche Grenze war.

»[...] Das Gespräch ging schnell zu den menschlichen Fragen und Unglücken unserer Zeit; über die menschlichen ist die Einigkeit von selbst gegeben; bei den politischen Fragen werde ich schwer damit fertig, dass selbst bei einem Mann wie Bohr Denken, Fühlen und Hassen nicht ganz getrennt werden können. Aber wahrscheinlich soll das auch gar nie getrennt werden [...]

Im Bohr'schen Institut hatten wir einige wissenschaftliche Diskussionen, die Kopenhagener wissen aber auch nicht viel mehr als wir. Morgen beginnen die Vorträge im Deutschen Wissenschaftlichen Institut; der erste offizielle Vortrag ist meiner, morgen Abend. Leider werden die Mitglieder des Bohr'schen Instituts aus politischen Gründen nicht kommen. Es ist merkwürdig, wie man hier, obwohl die Dänen ja völlig ungestört leben können und es ihnen ausgezeichnet geht, verstanden hat, so viel Hass oder Angst zu erzeugen, dass auch eine Verständigung auf kulturellem Gebiet – wo sie früher selbstverständlich war – fast unmöglich geworden ist.

Im Bohr'schen Institut hab ich einen kleinen Vortrag auf Dänisch gehalten, das war natürlich genau so wie früher (die Leute vom Deutschen Wissenschaftlichen Institut hatten das ausdrücklich gebilligt) aber in das Deutschen Institut will man aus grundsätzlichen Erwägungen nicht gehen, weil bei und nach der Gründung eine Reihe von zackigen Reden über die Neue Ordnung in Europa gehalten worden sind [...]

38 Carl Friedrich von Weizsäcker an den DAAD (22. Juni 1941) REM 2943, 538 BAP.

Heute Abend war ich noch einmal, zusammen mit Weizsäcker, bei Bohrs. Das war in vieler Weise besonders nett, das Gespräch drehte sich einen großen Teil des Abends um rein menschliche Probleme [...]«

Werner Heisenbergs Brief an seine Frau (von Kopenhagen, September 1941)³⁹

Für diese Reise, wie bei allen solchen Auslandsvorträgen, war es erforderlich, dass die Naturwissenschaftler anschliessend offizielle Berichte einreichten. Wahrscheinlich empfand v. Weizsäcker, dass er auf den Boykott von den meisten dänischen Physikern reagieren sollte. Sein Bericht endete ausweichend.

»Der lebendige Beweis dafür, dass in Deutschland auch während des Krieges erfolgreich Wissenschaft getrieben wird, und die Möglichkeit, in persönlichen Gesprächen eine Reihe schiefer Urteile über Deutschland richtig zu stellen, war wohl nicht ohne Bedeutung.«

Carl Friedrich von Weizsäcker,
Zusammenfassender Bericht über die
astrophysikalische Arbeitswoche in
Kopenhagen vom 18.-24.9.41
(1. Oktober 1941)⁴⁰

Im Gegensatz war Heisenbergs Bericht überraschend freimütig.

»Von dem Zusammensein mit dänischen Kollegen habe ich den Eindruck gewonnen, dass unsere Beziehungen zu den wissenschaftlichen Kreisen in Skandinavien jetzt recht schwierig sind. Man stösst überall auf eine sehr reservierte, oft auch ablehnende Haltung. Nur wenige dänische Kollegen sind bei der augenblicklichen Lage zu einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit in einem mehr oder weniger offiziellen Rahmen, wie ihn das Deutsche Wissenschaftliche Institut darstellt, bereit. Die Dänen nehmen diese Haltung ein, obwohl mir gegenüber fast alle Kollegen betont haben, dass sie über

39 <http://werner-heisenberg.unh.edu/kop-letter.htm> (14. April 2006).

40 Carl Friedrich von Weizsäcker, »Bericht« (1. Oktober 1941) REM 2943, 549-50 BAP.

das Verhalten der deutschen Wehrmacht nicht die geringste Klage vorzubringen hätten.«

Werner Heisenberg, »Bericht über die Teilnahme an einer astrophysikalischen Arbeitstagung im Deutschen wissenschaftlichen Institut in Kopenhagen« (23. September 1941)⁴¹

Jedoch betrachteten die deutschen Propagandabeamten in Dänemark den Besuch als einen Erfolg.

»Sowohl die Kolloquien als auch die Vorträge der Arbeitswoche durch hervorragende deutsche Wissenschaftler trugen dazu bei, dem Deutschen Wissenschaftlichen Institut neue dänische Forscher zuzuführen und damit den Teilnehmerkreis des Instituts zu erweitern.«

Der Bevollmächtigte des Deutschen Reiches an das Auswärtige Amt (26. September 1941)⁴²

In Kopenhagen hat Heisenberg seine dänischen Kollegen mit seinen nationalistischen Bemerkungen befremdet. Zwei Jahr später, als sich die Kriegslage für Deutschland sich verschlechterte und Propagandaminister Josef Goebbels nach einem »totalen Krieg« aufrief, hat Heisenberg noch einmal ausländische Kollegen während eines Besuches in Holland befremdet. Unmittelbar nach dem Ende des Krieges wiederholt der holländische Physiker Hendrik Casimir Heisenbergs Argument.

»[Heisenberg (1943)] Nur eine Nation, die skrupellos regiert, schafft es, sich selbst zu erhalten. Demokratie kann nicht die Energie entwickeln, die nötig ist um Europa zu regieren. Deswegen gibt es nur zwei

41 Werner Heisenberg, »Bericht« (23. September 1941) REM 2943, 547 BAP.

42 Der Bevollmächtigte des Deutschen Reiches an das Auswärtige Amt (26. September 1941) REM 2943, 544-45 BAP.

Möglichkeiten: Deutschland und Russland. Und dann wäre vielleicht Deutschland das kleinere Übel.«

Hendrik Casimir (1945) über
Heisenbergs Besuch nach Holland
1943⁴³

1944 reiste Heisenberg noch einmal nach Kopenhagen, um die Besetzung von Bohrs Institut (inzwischen war dieser aus Dänemark geflohen) zu beenden und die Plünderung des Institutes zu verhindern. Die Beamten haben Heisenbergs Meinung unterstützt und den Dänen wieder den Zutritt zum Institut und die Möglichkeit zu wissenschaftlicher Arbeit erlaubt. Kurz danach bekam Heisenberg noch eine Einladung, im Deutschen Wissenschaftlichen Institut vorzutragen.

»In der Zeit vom 18.-22. April 1944 war ich in Kopenhagen als Gast des dortigen Deutschen Wissenschaftlichen Institutes. Der Leiter des Instituts, Herr Professor Höfler, hatte mich eingeladen, einen Vortrag zu halten, für den ich das Thema »Die kleinsten Bausteine der Materie« gewählt hatte. Der Vortrag [...] wurde im wesentlichen von Deutschen besucht, die sich entweder dauernd oder durch die Kriegsumstände bedingt in Kopenhagen aufhielten. Die dänischen Kollegen hatten fast ausnahmslos abgelehnt, auch die Professoren, die vor dem Rücktritt der dänischen Regierung noch ins Institut gekommen waren (z. B. bei der Tagung über astrophysikalische Probleme im Jahre 1941) [...]

Die dänischen Kollegen luden mich ein [...] [in Bohrs Institut] einen wissenschaftlichen Vortrag über meine eigenen Arbeiten der letzten Zeit zu halten [...] Das Zusammensein gab mir auch Gelegenheit, dänische Kollegen zu fragen, weshalb sie zu meinem Vortrag im Deutschen Wissenschaftlichen Institut nicht erschienen waren. Dabei ergab sich, dass die Dänen dieses Institut als eine politische Institution betrachten, und dass sie wegen des gespannten politischen Verhältnisses zwischen Deutschland und Dänemark [...] glauben, sich einer politischen Institution gegenüber vollste Zurückhaltung auferlegen zu müssen.

43 Gerard Kuiper an Fischer (30. Juni 1945) Gerard Kuiper Papers, University of Arizona, Tuscon, Arizona USA.

Unter diesen Umständen wird man, wie Herr Professor Höfler mit Recht betonte, die Dänen für das Institut wahrscheinlich nur gewinnen können, wenn man sich zunächst rein an die wissenschaftliche Arbeit hält und die mehr propagandistische Seite der Tätigkeit, wie Vorträge und dergleichen, auf eine spätere günstigere Zeit verschiebt. Nach glücklicher Beendigung des Krieges wird die wissenschaftliche Zusammenarbeit mit den Dänen sicher nicht auf Schwierigkeiten stossen.«

Werner Heisenberg an das
Reichserziehungsministerium
(27. April 1944)⁴⁴

»Nach meiner Rückkehr von Kopenhagen möchte ich Ihnen noch einmal herzlich für die netten Tage in dieser schönen Stadt danken, in der ich ja früher mehrere Jahre lang fast zu Hause war. Sie haben durch Ihre Gastfreundschaft dafür gesorgt, dass mir diese Tage noch lange Zeit in bester Erinnerung bleiben werden, und ich glaube, dass mein Besuch durch das Zusammensein mit den dänischen Kollegen auch etwas zur Versöhnung der Gegensätze beigetragen hat. In meinem Bericht über die Reise nach Kopenhagen habe ich unseren gemeinsamen Standpunkt hinsichtlich der Aufgaben und Möglichkeiten des Deutschen Wissenschaftlichen Instituts energisch vertreten [...]«

Werner Heisenberg an Otto Höfler
(27. April 1944)⁴⁵

Nach dem Krieg versuchte Höfler, seine akademische Laufbahn wieder aufzunehmen, und bezog sich auf Heisenbergs Empfehlung.

»Der Germanist Otto Höfler [...] bewirbt sich um Wiederaufnahme in den Lehrkörper der Universität. Könnten Sie mir aus Ihren Kopenhagener Erfahrungen etwas darüber mitteilen, ob sich Herr Höfler in seiner Stellung dort streng auf die Wissenschaft beschränkt

44 Werner Heisenberg, »Bericht« (27. April 1944) Uk. H185 I, 32 Archiven der Humboldt Universität Berlin [HUB].

45 Heisenberg an Otto Höfler (27. April 1944) HN.

oder sich auf das Gebiet der politischen Kulturpropaganda begeben hat?»

Der Dekan der Philosophischen
Fakultät der Universität München an
Werner Heisenberg (28. Juni 1949)⁴⁶

Heisenbergs Antwort war gegenüber Höfler höflich und scheint nicht ganz ehrlich zu sein.

»Obwohl ich im Kriege zweimal in Kopenhagen war und im deutschen Wissenschaftlichen Institut vorgetragen habe [...], glaube ich, Herrn Höfler persönlich nicht kennen gelernt zu haben. Er war, wenn ich mich recht erinnere, in beiden Fällen gerade verreist. Aber ich habe damals mit ihm korrespondiert und aus seinen Briefen keinen unangenehmen Eindruck behalten. Auch hatte das deutsche Wissenschaftliche Institut in Kopenhagen kein ganz schlechtes Ansehen. Es galt nicht als eine Stelle ausgesprochener Nazi Propaganda, und wenn auch die Dänen seit 1943 nicht mehr in dieses Institut kamen, so war das wohl nicht Höflers Schuld. Vielmehr lag dies wohl einfach daran, dass die Dänen nicht mehr mit einem deutschen Sieg rechneten und nicht auf die falsche Karte setzen wollten [...].«

Werner Heisenberg an den Dekan der
Philosophischen Fakultät der
Universität München (4. Juli 1949)⁴⁷

Die früheste Darstellung Heisenbergs nach dem Krieg von seinem Verhalten und Motivationen während seines Besuches 1941 nach Kopenhagen findet man 1948 in einem Brief an den holländischen Mathematiker Bartel van der Waerden, der während des Dritten Reiches eine Professur in Leipzig innehatte. Dieser Brief schliesst die Vermutung ein, dass Heisenberg und seine Kollegen vorhatten, Hitler Kernwaffen zu verweigern und ihm dadurch zu widerstehen.⁴⁸

»Als ich (Ende 1941) wusste, dass der Uranpile gehen würde und dass man wahrscheinlich Atombomben würde machen können (aus Plutonium, die U235-Trennung schien mir noch phantastischer – in

46 Klinger an Werner Heisenberg (28. Juni 1949) HN.

47 Heisenberg an Klinger (4. Juli 1949) HN.

48 Mark Walker, Uranmaschine, S. 243-262, vor allem, 257-260.

beiden Fällen habe ich den Aufwand für noch grösser gehalten, als er tatsächlich war –) war ich tief erschrocken über die Möglichkeit, dass man irgendwelchen Machthabern (nicht nur Hitler) solche Waffen in die Hand geben könnte.

Als ich im Herbst 1941 Niels Bohr in Kopenhagen sprach, habe ich an ihn die Frage gerichtet, ob ein Physiker das moralische Recht habe, an Atomproblemen im Kriege zu arbeiten. Bohr fragte zurück, ob ich glaubte, dass eine kriegserische Verwendung der Atomenergie möglich sei, und ich antwortete: ja, das wusste ich. Ich habe dann meine Frage wiederholt, und Bohr antwortete zu meiner Verwunderung, dass der Kriegseinsatz der Physiker in allen Ländern unvermeidlich und daher wohl auch berechtigt sei. Bohr hat es offenbar für unmöglich gehalten, dass hier die Physiker aller Völker sich sozusagen gegen ihre Regierungen verbunden; er hat mir auch im vergangenen Sommer gesagt, dass er auf diesen Punkt nicht habe eingehen wollen und dass er daher meine Frage mehr als eine indirekte Information über den Stand unserer Kenntnisse aufgefasst habe [...]

Werner Heisenberg an Bartel van der Waerden (28. April 1948)⁴⁹

Die früheste Quelle für Bohrs Seite der Geschichte ist ein Brief aus dem Jahre 1946 von dem Emigranten und Physiker Rudolf Ladenburg an Samuel Goudsmit, einem anderen Emigranten.

»Haben Sie herzlichen Dank für Ihren aufschlussreichen Brief. In mancher Hinsicht bestätigt er, was Niels Bohr uns sagte [als er in den USA angekommen ist]: Heisenberg und Weizsäcker besuchten Bohr 1941 und haben ihre Hoffnung und Glaube ausgedrückt, dass wenn der Krieg lang genug dauert, die Atombombe die Entscheidung für Deutschland bringen wird.«

Rudolf Ladenburg an Samuel Goudsmit (23. Oktober 1946)⁵⁰
(Übersetzung aus dem Amerikanischen)

49 Werner Heisenberg an Bartel van der Waerden (28. April 1948) HN.

50 Rudolf Ladenburg an Samuel Goudsmit (23. Oktober 1946) SGP.

1947 fand Heisenberg das Kriegsverbrecherverfahren gegen Ernst von Weizsäcker, dem Vater von Carl Friedrich, beunruhigend und schrieb einen nie veröffentlichten Essay über die Opposition zum Nationalsozialismus. Obwohl dieser Essay offensichtlich für Weizsäcker relevant ist, scheint er auch autobiographisch zu sein.

»[...] Nachdem [...] die Macht in der Hand Hitlers war, hatte die relativ dünne Schicht der Menschen, denen ihr sicherer Instinkt sagte, dass das neue System von Grund auf schlecht sei, nur noch die Möglichkeit zu passiver oder aktiver Opposition.

Diese Menschen konnten nämlich entweder sagen: Das Hitlersche System ist grundschlecht und wird zu einer großen Katastrophe für Deutschland und Europa führen, aber ich sehe keinen Weg, daran irgendetwas von Deutschland her zu ändern. Also wandere ich aus oder ich ziehe mich jedenfalls in Deutschland von aller Verantwortung zurück und warte ab, bis durch einen Krieg von außen her (und durch die damit verbundenen unerhörten Opfer an Gut und Blut) das System beseitigt wird. Diese Haltung möchte ich als Haltung der passiven Opposition bezeichnen [...]

Eine andere Gruppe von Menschen hat etwa in folgender Weise geurteilt: Ein Krieg ist, selbst wenn er zur Beseitigung des Nationalsozialismus dient, eine so entsetzliche Katastrophe und würde so vielen Millionen Menschen das Leben kosten, dass ich selbst unbedingt alles tun muss, was in meiner Macht steht, um diese Katastrophe zu verhindern, oder wenn sie eingetreten ist, sie abzukürzen und zu verringern und den dabei leidenden Menschen zu helfen.

Viele der Leute, die so dachten, aber die Stabilität einer modernen Diktatur nicht kannten, haben in den ersten Jahren den Weg des offenen, unmittelbaren Widerstandes versucht und im Konzentrationslager beendet. Den anderen, die die Aussichtslosigkeit des direkten Angriffs auf die Diktatur erkannt hatten, blieb als einziger Weg die Erwerbung oder Bewahrung eines gewissen Maßes am Einfluss, also eine Haltung, die nach außen als ein Mittun erscheinen muss.

Es ist wichtig, sich klarzumachen, dass dies tatsächlich der einzige Weg war, wirklich etwas zu ändern. Ich möchte diese Haltung, die ja allein Aussichten bot, den Nationalsozialismus ohne enorme Op-

fer durch etwas Besseres zu ersetzen, als die Haltung der aktiven Opposition bezeichnen [...]«

Werner Heisenberg, »Die aktive und die passive Opposition im Dritten Reich« (12. November 1947)
[unveröffentlichtes Manuskript]⁵¹

Außen- und Innenpolitik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Vom Nationalsozialismus wurde auch die Deutsche Physikalische Gesellschaft beeinflusst. Jedoch waren die Auswirkungen anders als bei Einzelpersonen.⁵² Das Hauptproblem war der Verlust von Mitgliedern, die ihre Stellen verloren und Deutschland verliessen.

»Ich habe mich sehr gefreut, anlässlich der Übersendung Ihres Mitgliedsbeitrages ein Lebenszeichen von Ihnen erhalten [...] Zugleich mit der Mitgliedskarte sende ich Ihnen herzliche Grüße und hoffe, dass Ihre Übersiedlung nach Kopenhagen uns eine größere Chance für ein Wiedersehen gibt.«

Walter Grotian an James Franck
(29. Januar 1934)⁵³

Einige DPG-Mitglieder haben auf der ausländischen Kritik an den nationalsozialistischen Maßnahmen, und dadurch indirekt auf die Säuberungen, reagiert.

51 Werner Heisenberg, »Die aktive und die passive Opposition im Dritten Reich« (12. November 1947) [unveröffentlichtes Manuskript] HN.

52 Dieter Hoffmann und Mark Walker, »Zwischen Autonomie und Anpassung. Die Deutsche Physikalische Gesellschaft im Dritten Reich«, *Physik Journal*, 5 Nr. 3 (2006), S. 53-58; Dieter Hoffmann und Mark Walker (Hrsg.), *Physiker zwischen Autonomie und Anpassung* (Weinheim 2006).

53 Walter Grotian an James Franck (29 Januar 1934), Franck Papers [FP], Special Collection Research Center, University of Chicago, Chicago, Illinois USA.

»In den letzten Monaten sind in ausländischen Zeitschriften, besonders in England und Amerika (Nature und Science), wiederholt Artikel, Reden, Aufrufe usw. erschienen, die in zum Teil propagandistisch sehr geschickter Weise deutsche Regierungsmaßnahmen und die Abwanderung deutscher Gelehrter zum Anlass nehmen, um eine uns ungünstige Stimmung zu verbreiten und insbesondere die angelsächsischen Länder als die einzigen Horte der Geistes- und Wissenschaftsfreiheit zu empfehlen [...]«

Karl Mey (Präsident der DPG) an die
Gauvereine und Ortsgruppen der
Deutschen Physikalischen
Gesellschaft und der Deutschen
Gesellschaft für technische Physik
(27. Februar 1934)⁵⁴

Anscheinend hat die DPG nur widerwillig anerkannt, dass die Lage außergewöhnlich war und Naturwissenschaftler nur wegen ihrer Rasse ihre Stellen verloren hatten. Stattdessen haben führende Mitglieder der DPG sich mit Kollegen außerhalb Deutschlands in Verbindung gesetzt und sie gemahnt, ihre Jahresbeiträge wieder zu bezahlen.

»Der Schatzmeister der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Professor Dr. W. Schottky, sagte mir kürzlich, Sie wären ihm gänzlich entschwunden, hätten weder eine Adresse hinterlassen, noch seit 1933 den Mitgliedsbeitrag bezahlt. Ich nehme doch an, dass Sie nicht allen Kontakt mit uns deutschen Physikern aufgeben wollen, auch wenn Sie jetzt weniger häufig als früher hierher zurückkehren; und so bitte ich Sie freundlichst, 2 Jahresbeiträge von je 8 Reichsmark [...] zu überweisen [...]«

Max von Laue an Theodor von Kármán (4. Mai 1935)⁵⁵

54 Karl Mey (Präsident der DPG) an die Gauvereine und Ortsgruppen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für technische Physik (27. Februar 1934) DPG 10011, Archiven der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [DPG] Berlin.

55 Max von Laue an Theodor von Kármán (4. Mai 1935) Kármán Papers [KP], California Institute of Technology Archives, Pasadena, California, USA.

»[...] Bitte grüssen Sie Herrn Schottky von mir. Ich überweise gleichzeitig R.M. 16,— für die Physikalische Gesellschaft.

Die hiesigen Physiker lassen Sie bestens grüssen. Diese Woche hatten wir einen sehr interessanten Vortrag von Dirac und auch von Guido Beck, der über Japan nach Odessa fährt. Zweifellos hat die Entwicklung der letzten Jahre eine wahre Brown'sche Bewegung der Physiker in Aktion gesetzt. Es scheint mir, dass die damit verbundene Diffusion vielen Ländern ganz nützlich sein kann.«

Theodor von Kármán an Max von
Laue (3. Juni 1935)⁵⁶

»[...] Gleichzeitig mit meinem Brief an Sie ging im Mai eine ganze Reihe von ›Tretbriefen‹ ab. Bisher hat außer Ihnen nur einer geantwortet und zwar in dem Sinne, dass er die offiziellen Beziehungen zur Deutschen Physikalischen Gesellschaft allmählich einschlafen lassen wolle. Aus dem Schweigen der anderen muss ich fast schließen, dass sie dieselbe Absicht haben. Sagen Sie doch deutschen Physikern, welche noch in Brownscher Bewegung sind oder sich schon sedimentiert haben, dass mir der Mann, der auf den Sack schlug, weil er den Esel meinte, niemals als Muster besonderer Klugheit erschienen ist [...]«

Max von Laue an Theodor von
Kármán (15. Juni 1935)⁵⁷

»Ich möchte mich noch in einer anderen Sache an Sie wenden: Als Vorstandsmitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft erfahre ich, dass Sie seit zwei Jahren die Mitgliedsbeiträge nicht mehr geschickt haben. Ich kann mir wohl denken, dass pekuniäre Schwierigkeiten die Ursache sind, möchte aber dennoch fragen, ob Sie, der Sie als alter Institutsgenosse und als Freund und Mitarbeiter bei vielen deutschen Physikern geschätzt sind, nicht doch die Mitgliedschaft beibehalten wollen. Ich brauche nicht hinzuzufügen, dass es

56 Theodor von Kármán an Max von Laue (3. Juni 1935) KP.

57 Max von Laue an Theodor von Kármán (15. Juni 1935) KP.

mich persönlich natürlich ganz besonders freuen würde, wenn neben den persönlichen Beziehungen auch die Beziehung durch die Physikalische Gesellschaft aufrechterhalten bliebe.«

Walther Gerlach an Samuel Goudsmit
(10. Februar 1936)⁵⁸

»Ich habe sehr lange mit der Beantwortung Ihres Briefes gewartet. Der Grund ist das sich meine Meinung jeden Tag änderte. Ich hätte Ihnen eigentlich zwei einander widersprechend Briefe schreiben sollen. Es ist mir nämlich unmöglich zu entscheiden ob ich meinen Beitrag an die Deutsche Physikalische Gesellschaft bezahlen soll oder nicht. Es sind natürlich keine finanziellen Gründe welche mir den Entschluss so schwierig machen. Sie verstehen wohl, dass ich in den letzten paar Jahren eine Potenz des Betrages welche ich der Gesellschaft schulde auf deutsche Physiker angewandt habe.

Manchmal sehe ich gar nicht ein, welchen Zweck es hat, die Deutsche Physikalische Gesellschaft noch länger zu unterstützen. Die unmenschliche Behandlung vieler ausgezeichneten deutscher Wissenschaftler stimmt mich sehr traurig und ich kann mich auch nicht an den Gedanken gewöhnen, dass ich selber in dem mir so lieben Deutschland nicht mehr willkommen bin. Auch während in andern Ländern wie Italien und Amerika die Physik große Fortschritte macht, ist sie in Deutschland fast ganz stehen geblieben.

Andererseits tat es mir gut zu wissen, dass ich noch einige richtige Freunde in Deutschland habe. Die schönste Zeit meiner Studien habe ich ja in Deutschland verbracht und so habe ich schließlich doch den Entschluss gefasst meine Mitgliedschaft nicht ganz aufzugeben. Sie verstehen wohl aus diesem Brief wie schwierig mir dieser Entschluss war [...]

P.S. Ich habe Herrn Schottky den Beitrag übersandt.«

Samuel Goudsmit an Walther Gerlach
(24. Juni 1936)⁵⁹

58 Walther Gerlach an Samuel Goudsmit (10. Februar 1936) SGP.

59 Samuel Goudsmit an Walther Gerlach (24. Juni 1936) SGP.

»Ich möchte Ihnen mitteilen, dass ich meine Mitgliedschaft in der DPG kündige. Ich bin enttäuscht, weil die Gesellschaft als Organisation nie gegen die bitteren Angriffe gegen einige ihrer herausragenden Mitglieder protestiert hat. Außerdem kommen heute sehr wenige Beiträge zu Physik aus Deutschland. Der Hauptexport von Deutschland ist Hasspropaganda.«

Samuel Goudsmit an Walther
Schottky (17. Dezember 1937)⁶⁰
[Übersetzung aus dem
Amerikanischen]

»Ihren Austritt aus der Deutschen Physikalischen Gesellschaft habe ich mit Bedauern zur Kenntnis genommen.

Eine Stellungnahme in dem von Ihnen gewünschten Sinn ist leider praktisch nicht möglich gewesen. Ebenso ist unsere Gesellschaft für die Verminderung der physikalischen wissenschaftlichen Produktion nicht verantwortlich zu machen. Soweit wissenschaftliche Arbeit durch die Bemühungen einer Gesellschaft überhaupt gefördert werden kann, glauben wir unsere Pflicht zu tun. Wir sind froh gewesen, in unserer Arbeit bisher durch das Weiterbestehen der Beziehungen zu unseren ausländischen Kollegen unterstützt worden zu sein und würden es sehr bedauern, wenn darin ein Wandel einträte.«

Walther Schottky an Samuel
Goudsmit
(3. Januar 1938)⁶¹

Die DPG hat ihre letzten jüdischen Mitglieder entlassen und ihre Satzung an nationalsozialistische Richtlinien angepasst. Jedoch im Gegensatz zu den Chemiker-, Ingenieur- und Mathematiker-Verbänden hat die DPG dies nur verhältnismäßig spät getan, als sie vom Ministerium dazu gezwungen wurde.

»[...] zu Ihrer freundlichen Mitteilung über das beabsichtigte Rundschreiben [über Juden in der DPG] vom 8.12. erlaube ich mir folgendes zu bemerken. Innerhalb unserer Gesellschaft bilden die von dem

60 Samuel Goudsmit an Walther Schottky (17. Dezember 1937) SGP.

61 Walther Schottky an Samuel Goudsmit (3. Januar 1938) SGP.

Rundschreiben betroffenen Mitglieder in Deutschland eine verhältnismäßig kleine Gruppe, von der wohl weder ein besonderes Hervortreten zu erwarten wäre noch eine merkbare Lücke, wenn sie der Gesellschaft fernblieben. Wenn jedoch eine derartige offizielle Ausschlussaktion erfolgt, wie sie jetzt beabsichtigt ist, besteht die Befürchtung, dass nicht nur die ausländischen nicht arischen Mitglieder, sondern, bei der bekannten Einstellung des Auslandes, auch der größte Teil unserer sonstigen ausländischen Mitglieder ihre Mitgliedschaft in der Gesellschaft aufgeben würden. Sie wissen, dass wir unter unseren etwa 1350 Mitgliedern ca. 350, d. h. über 25%, ausländische haben; das entspricht ebenso der Tradition unserer Gesellschaft wie der internationalen Bedeutung der deutschen Wissenschaft. Verlieren wir einen großen Teil dieser Mitglieder, so bedeutet das einen Verlust, der m. E. auch vom staatspolitischen Standpunkt bedauerlich ist; als Schatzmeister habe ich überdies darauf hinzuweisen, dass wir seitens der ausländischen Mitglieder immerhin mit einem nicht unbeträchtlichen Deviseneingang (an Mitgliedsbeiträgen und durch Mitgliedschaft vermittelten Büchern und Zeitschriftenkäufen) zu verzeichnen haben.«

Walther Schottky an Peter Debye
(3. Dezember 1938)⁶²

»Unter den zwingenden obwaltenden Umständen kann die Mitgliedschaft von reichsdeutschen Juden im Sinne der Nürnberger Gesetze in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft nicht mehr aufrechterhalten werden.

Im Einverständnis mit dem Vorstand fordere ich daher alle Mitglieder, welche unter diese Bestimmung fallen, auf, mir ihren Austritt aus der Gesellschaft mitzuteilen.«

Peter Debye an die deutschen
Mitglieder der Deutschen
Physikalischen Gesellschaft.
(9. Dezember 1938)⁶³

62 Walther Schottky an Peter Debye (3. Dezember 1938) Nachlaß Peter Debye, III Abteilung, Rep 19, Nr. 1014 MPG-Archiv.

63 Peter Debye an die deutschen Mitglieder der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. (9. Dezember 1938) Nachlaß Peter Debye, III Abteilung, Rep 19, Nr. 1014 MPG-Archiv.

Es gab eine kleine Gruppe von nationalsozialistischen Aktivisten innerhalb der DPG, die die führenden Mitglieder der Gesellschaft gedrängt haben, den Nationalsozialismus deutlicher und mit mehr Begeisterung zu vertreten.

»Ich bin Ihnen sehr dankbar, dass Sie mich über die internen Pläne des Vorstandes der Physikalischen Gesellschaft unterrichtet haben. So sehr ich Debye als Wissenschaftler schätze, umso mehr habe ich Bedenken, je länger ich mir das ansehe, ihn als Vorsitzenden der Gesellschaft zu wissen [...]

Eigentlich ist es eine Schande, dass wir uns mit solchen Bagatellen und diesen Bürgersleuten herumschlagen müssen, während unser Führer Geschichte macht und uns eine große Aufgabe nach der andern zeigt.

Es hat mir sehr leid getan, dass ich Sie hier nicht begrüßen konnte. Es ist gut und notwendig, dass die Nazis an den Hochschulen in enger Fühlung bleiben [...]

Herbert Stuart an Georg Stetter
(17. März 1939)⁶⁴

»Ich war seinerzeit nicht sehr glücklich, als Debye in Kreuznach Vorsitzender der Gesellschaft wurde. Soviel ich weiß, ist die Wahl aber mit Zustimmung des Ministeriums erfolgt, und Debye hat auch, soweit ich das beobachten konnte, sich für seine Amtsführung die Richtlinien stets im Ministerium geholt. Die Behandlung der Judenfrage durch die D.P.G. zeigte jedoch, dass für die politischen Fragen ihm, wie nicht anders zu erwarten, das erforderliche Verständnis fehlt.«

Wilhelm Schütz an Herbert Stuart
(4. April 1939)⁶⁵

Keiner der Präsidenten der DPG war überzeugter Nationalsozialist, jedoch haben einige trotzdem Freude über Hitlers Außenpolitik und Kriegserfolge ausgedrückt. Obwohl es üblich wenn nicht Pflicht war,

64 Herbert Stuart an Georg Stetter (17. März 1939) SGP.

65 Wilhelm Schütz an Herbert Stuart (4. April 1939) SGP.

Hitler zu loben, ging Jonathan Zenneck 1940 bei der Eröffnung der Physikertagung erheblich weiter.

»[...] Ich bin überzeugt, dass in diesen Zeiten in den Ländern unserer Feinde keine wissenschaftlichen Tagungen abgehalten werden. Dass wir es tun können, verdanken wir unserem tapferen Heere und seiner hervorragenden Führung, die bisher die schlimmsten Schrecken des Krieges von unserem Lande ferngehalten haben. Wir danken es dem Manne, der in wenigen Jahren aus Deutschland ein Volk in Waffen machte, der der Ohnmacht Deutschlands in den 15 Jahren nach dem Weltkrieg ein Ende bereitet und Deutschland wieder diejenige Stellung verschafft hat, die es nach seinen Leistungen auf allen Gebieten beanspruchen kann.

Wir sind heute mehr als je durchdrungen von dem tiefsten Danke für unseren Führer, wir sind alle beseelt von dem Vertrauen, dass er das Werk, das er begonnen, zu einem für uns alle glücklichen Ende führen wird. Ich bitte Sie, unserem Dank und unserer Begeisterung für unsern Führer Ausdruck zu geben, indem Sie mit mir einstimmen in den Ruf

»Unser Führer Adolf Hitler Sieg-Heil!«

Jonathan Zenneck, »Deutsche
Physikertagung Kriegsjahr 1940«⁶⁶

Als der Industriephysiker Carl Ramsauer DPG Präsident wurde, strebte er aktiv nach einer Mobilisierung der Physik für den Krieg und erhöhte die Unterstützung der Regierung durch die DPG. Als Teil dieser Kampagne setzte er die jetzt schon unfähige »deutsche Physik« Bewegung als Vorwand ein für die Bedrohung durch die Erfolge der amerikanischen Naturwissenschaft.

»Als Vorsitzender der Deutschen Physikalischen Gesellschaft halte ich es für meine Pflicht, die Befürchtungen, die ich für die Zukunft der deutschen Physik als Wissenschaft und Machtfaktor habe, Ihnen vorzulegen [...]

Die deutsche Physik hat ihre frühere Vormachtstellung an die amerikanische Physik verloren und ist in Gefahr, immer weiter ins Hintertreffen zu geraten [...]

66 Jonathan Zenneck, »Deutsche Physikertagung Kriegsjahr 1940«, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Nr. 2 (1940), S. 32.

Die Fortschritte der Amerikaner sind außerordentlich groß. Dies beruht nicht allein darauf, dass die Amerikaner weit höhere materielle Mittel einsetzen, als wir, sondern mindestens in gleichem Maße darauf, dass es ihnen gelungen ist, eine zahlenmäßig starke, sorgenfrei und freudig arbeitende junge Forschergeneration heranzuziehen, welche der unsrigen aus der besten Zeit in ihren Einzelleistungen gleichwertig ist und sie durch die Fähigkeit zur Gemeinschaftsarbeit übertrifft [...]

Der eine Hauptzweig der Physik, die theoretische Physik, wird bei uns immer mehr in den Hintergrund gedrängt. Der berechtigte Kampf gegen den Juden Einstein und gegen die Auswüchse seiner spekulativen Physik hat sich auf die ganze theoretische Physik übertragen, und sie weitgehend als ein Erzeugnis jüdischen Geistes in Missachtung gebracht [...] Dadurch wird die Schaffensfreudigkeit unserer Theoretiker gelähmt und der Nachwuchs von der Pflege der theoretischen Forschung abgeschreckt [...]

Carl Ramsauers Eingabe an Minister
Bernhard Rust (20. Januar 1942)⁶⁷

»Will man die physikalische Forschung und Ausbildung in dem Maße fördern, wie es der wirklichen Bedeutung der Physik im Rahmen des Ganzen entspricht, oder will man die deutsche Physik als militärischen Machtfaktor richtig einschätzen, so muss man sich zunächst über das eigentliche Wesen der Physik klar werden. Man darf die Physik nicht nur als eine, wenn auch hochwichtige, Einzelwissenschaft ansehen, sondern muss gleichzeitig ihre Allgemeinbedeutung berücksichtigen, die weit über die Grenzen einer Einzelwissenschaft hinausgeht [...] (Abb. 2)

Die Physik wird so zu einer der wesentlichsten Grundlagen unserer Wirtschaft und Wehrkraft. Dies gilt ganz besonders für jeden Wettbewerb mit anderen Völkern auf wirtschaftlichem und militärischem Gebiet. Eine fertige Technik kann ohne große Schwierigkeiten nachgeahmt werden, die Werdeprozesse neuer Technik und neuer Naturwissenschaft sind dagegen an das geistige Potential der Rasse gebunden. Dieser Schlüsselstellung der Physik muss auch der Staat Rechnung tragen, wenn es sich um die materielle Unterstützung der

67 Carl Ramsauers Eingabe an Minister Bernhard Rust (20. Januar 1942) PN.

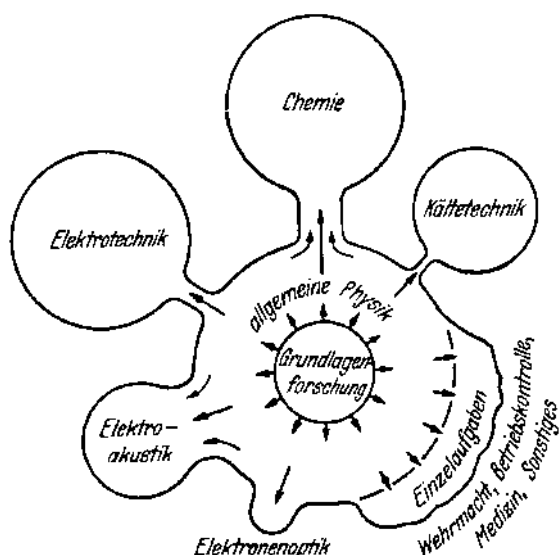


Abbildung 2

physikalischen Forschung oder um die optimale Organisation der physikalischen Ausbildung handelt.«

Carl Ramsauer, »Die Schlüsselstellung der Physik für Naturwissenschaft, Technik und Rüstung« (1943)⁶⁸

Nach der bedingungslosen Kapitulation der deutschen Wehrmacht und dem Zusammenbruch des Nationalsozialismus versuchten deutsche Naturwissenschaftler und naturwissenschaftliche Institutionen sich zu rehabilitieren. Die DPG versuchte wieder Kontakt mit Kollegen aufzunehmen, die während des ersten Jahres des Dritten Reiches vertrieben wurden.

»[...] Die in diesem Verbande (Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften) zusammengeschlossenen deutschen Physiker laden die ehemaligen Mitglieder der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

68 Carl Ramsauer, »Die Schlüsselstellung der Physik für Naturwissenschaft, Technik und Rüstung«, Die Naturwissenschaften, 25/26 (1943), S. 285-288.

und der Deutschen Gesellschaft für Technische Physik, welche jetzt im Auslande leben, zum Beitritt in den Verband ein. Sie würden sich sehr freuen, wenn die ehemaligen Mitglieder sich entschliessen könnten, dieser Einladung zu folgen.

Wir bedauern auf das Tiefste, dass viele der früheren Mitglieder nach 1933 aus politischen Gründen gezwungen wurden, aus den damaligen Gesellschaften auszuseiden und wir können verstehen, wenn diese Einladung bei ihnen vielleicht zwiespältige Gefühle hervorruft. Wir dürfen aber versichern, dass beide Gesellschaften sich solange als möglich bemüht haben, das Unrecht zu vermeiden, und wir bitten die früheren Mitglieder, diese Einladung als Ausdruck unseres aufrichtigen Bestrebens anzusehen, die unwürdigen Vorgänge der Hitlerzeit wieder gut zu machen, soweit uns dies möglich ist [...]«

Karl Wolf und Max von Laue,
Verband Deutscher Physikalischer
Gesellschaften an die im Ausland
lebenden ehemaligen Mitglieder der
Deutschen Physikalischen
Gesellschaft and der Deutschen
Gesellschaft für Technische Physik
(12. März 1953)⁶⁹

Viele ehemalige Mitglieder waren bereit, sich wieder an die DPG zu binden.

»Auf Ihr sehr freundliches Telegramm, in dem Sie mir mitteilten, dass die Deutsche Physikalische Gesellschaft mich zum Ehrenmitglied zu ernennen wünscht, habe ich Ihnen nach Wiesbaden ein Telegramm gesandt, in dem ich mit herzlichem Dank und Freude die große Ehrung annehme [...]

Da ich viele Jahre lang ein Mitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft war, so weiß ich die große Ehrung, die man mir erwiesen hat, sehr wohl zu würdigen. Die Physikalische Gesellschaft hat mir vor nicht langer Zeit die Ehre angetan, mir die Planck-Medaille zu verleihen. Ich kann nur wiederholen was ich damals sagte. Diese neue

69 Karl Wolf und Max von Laue, Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften an die im Ausland lebenden ehemaligen Mitglieder der Deutschen Physikalischen Gesellschaft and der Deutschen Gesellschaft für Technische Physik (12. März 1953) FP.

Ehrung bestärkt nur mein Gefühl alter Anhänglichkeit und Dankbarkeit, die ich für so viele der alten Mitglieder fühle, die mir als Freunde, Kollegen und Lehrer in Deutschland so viel gegeben haben. Es bedeutet wirklich für mich viel zu sehen, wie freundlich die Gesellschaften noch meiner gedenken.«

James Franck an Karl Wolf
(4. Oktober 1955)⁷⁰

Sogar Einstein hat am Ende seines Lebens freundlich geantwortet, nachdem Max von Laue ihn zu einer Tagung über die Relativitätstheorie in Deutschland eingeladen hat. Geben wir Einstein das letzte Wort.

»Ich habe bisher mit der Beantwortung Deines lieben Briefes vom 16. Januar so lange gewartet, weil ich erst das Eintreffen einer offiziellen Einladung abwarten wollte, die aber bisher nicht eingetroffen ist. Vor allem freut es mich, dass ich in diesem außergewöhnlichen Falle zu brüderlichem Zusammenwirken und nicht zu Kontroversen Veranlassung gewesen bin.

Alter und Krankheit machen es mir unmöglich, mich bei solchen Gelegenheiten zu beteiligen und ich muss auch gestehen, dass diese göttliche Fügung für mich etwas Befreiendes hat. Denn alles was irgendwie mit Personenkultus zu tun hat, ist mir immer peinlich gewesen. In diesem Falle ist es umso mehr so, weil es sich hier um eine gedankliche Entwicklung handelt, an der viele ganz wesentlich beteiligt waren, eine Entwicklung, die weit davon entfernt ist, beendig zu sein. So habe ich mich entschlossen, mich an diesen Veranstaltungen, deren mehrere an verschiedenen Orten geplant sind, überhaupt in keine Weise zu beteiligen.

Wenn ich in den Grübeleien einen langen Lebens eines gelernt habe [...] ist es dies, dass wir von einer tieferen Einsicht in die elementaren Vorgänge viel weiter entfernt sind, als die meisten unserer Zeitgenossen glauben [...].«

Albert Einstein an Max von Laue
(3. Februar 1955)⁷¹

70 James Franck an Karl Wolf (4. Oktober 1955) FP.

71 Albert Einstein an Max von Laue (3. Februar 1955) EP.

Walter Jakob Gehring

New Perspectives on Eye Development and the Evolution of Eyes and Photoreceptors

Aktuelle Experimente zur genetischen Kontrolle der Entwicklung der Augen haben grundlegend neue Erkenntnisse über die Evolution der Augen eröffnet.

Die gezielte Expression eines einzigen Masterkontrollgens, dem *Pax6*, kann die Bildung ektopischer Augen sowohl in Insekten als auch in Vertebraten hervorrufen. Damit ist das Dogma des polyphyletischen Ursprungs verschiedener Augentypen in allen Tierstämmen in Frage gestellt.

Die Beteiligung der Gene *Pax6*, *six1* und *six3*, die die sehr konservativen Transkriptionsfaktoren bei der genetischen Kontrolle der Augenentwicklung auch in so entfernt verwandten Organismen, wie Planarien und Mensch, regulieren, sind ein starkes Argument für den monophyletischen Ursprung der Augen.

Da Transkriptionsfaktoren die Expression eines jeden Zielgens kontrollieren können, sofern sie geeignete regulatorische Elemente enthalten, liegt die Ursache der Konservierung der genetischen Kontrolle der Augenentwicklung durch *Pax6* bei allen bilateralen Tieren nicht in funktionellen Zwängen, sondern ist eine Konsequenz der Evolution. Darwin postulierte, dass der Prototyp der Augen aus nur zwei Zellen besteht, einem Photorezeptor und einer Pigmentzelle, und zufällig werden beide durch *Pax6* kontrolliert. Entsprechend scheint die Evolution der verschiedenen Augen nachträglich auf diesem ursprünglichen genetischen Programm aufzubauen.

Die Hypothese der interkalaren Evolution behauptet, dass die morphogenetische Entwicklung des Auges fortwährend durch Intercalation von Genen zwischen die Masterkontrollgene an der Spitze der Hierarchie und den Strukturgenen wie Rhodopsin am Ende, modifiziert worden ist. Das Hinzufügen neuer Gene in den morphogenetischen Stammbau kann grundsätzlich auf zwei verschiedene genetische Mechanismen zurückgeführt werden: die Genduplikation und die Fusion mit spezifischen Enhancern.

Verfolgt man die Evolution der Augen weiter als nur bis zu bilateralsymmetrischen Organismen zurück, so finden sich hoch entwickelte Augen bei einigen Quallen als auch bei einigen Hydrozoen.

In Hydrozoen werden dieselben orthologen *six* Gene (*six1* und *six3*) für die Regeneration der Augen ebenso benötigt, wie in Planarien. In der Qualle *Tripedalia* ist das *pax B* Gen in Augen exprimiert, welches ein Vorläufer von *Pax6* sein kann.

Im Gegensatz zum erwachsenen Tier, das hoch entwickelte Augen hat, hat die Planula Larve von *Tripedalia*, wie einige einzellige Protisten, einzellige Photorezeptoren.

Für den Ursprung von Photorezeptorzellen in Metazoen, schlage ich zwei Hypothesen vor, eine basiert auf der zellulären Differenzierung und eine weitere, mehr spekulative, basiert auf Symbiose.

Die erstere nimmt an, dass Photorezeptorzellen auf eingewanderte Protisten zurückgehen, deren Zellen alle photosensitiv waren und sich nachfolgend durch zelluläre Differenzierung Photorezeptorzellen entwickeln konnten. Die Symbiontenhypothese, welche ich das »Russische Puppen Modell« nenne, lässt vermuten, dass Photosensitivität zuerst in photosynthetischen Blaualgen entstanden ist, die später als primäre Chloroplasten in Rotalgen aufgenommen wurden.

Im Gegenzug wurden die Rotalgen als sekundäre Chloroplasten von Dinoflagellaten aufgenommen und entwickelten sich in einigen Organismen wie zum Beispiel in einigen Dinoflagellaten wie *Erythropsis* und *Warnovia*, welche keine Chloroplasten haben, zu höchst komplizierten Augenorganellen.

Weil Dinoflagellaten im allgemeinen als Symbionten in Cnidarians gefunden wurden, könnten die Dinoflagellaten ihre Photorezeptorgene in Cnidarians übertragen haben. Der Schritt von Photorezeptororganellen zu vielzelligen Augen ist dann bei Cnidarians wie *Tripedalia* erfolgt. Diese beiden Hypothesen, die zelluläre Differenzierung und die Symbionten Hypothese schließen sich nicht gegenseitig aus und sind derzeit Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Introduction

In the course of evolution several basically different eye types have been generated, like the camera-type eye, the compound eye, and the mirror eye (Fig. 1). These eye types are different not only with respect to their morphology and physiology but also with respect to their mode of development. This has led to the dogma that eyes have evolved in all animal phyla 40 to 60 times independently (Salvini-Plawen and Mayr 1961). However, recent genetic experiments cast serious doubts on this notion and argue strongly in favor of a monophyletic origin of the various eye types followed by divergent, parallel, and convergent evolution. In his latest book, Ernst Mayr (2001) admits that his earlier notion may

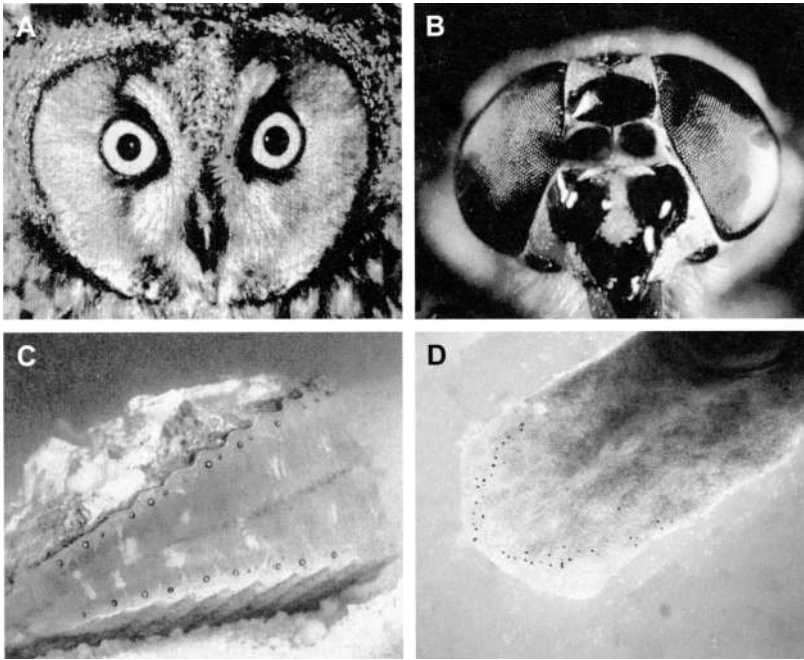


Figure 1: Different eye types. (A) Camera-type eye of an owl. (B) Compound eye of a horsefly. (C) Mirror-type eye of a scallop. (D) Prototypic eyes consisting of a single photoreceptor cell and a pigment cell in the planarian *Polycelis auricularia*.

no longer be correct. In the following article I discuss the evidence arguing for a monophyletic origin of the eyes, and I shall follow the eye back to its origins from single-celled photoreceptors.

The Genetic Control of Eye Development

Mutations affecting eye development are easily detectable and the *eyeless* (*ey*) mutation in *Drosophila* was discovered as early as 1915 by Hoge. A similar mutation was found in mice and designated as *Small eye* because the heterozygous animals have reduced eyes, whereas the homozygous fetuses that die *in utero* lack not only the eyes but also the nose and a large part of the forebrain, including the pineal organ

(Hill et al. 1991). A hereditary syndrome called aniridia causes a very similar phenotype in humans; reduced iris in heterozygous individuals, and two homozygous mutant aborted fetuses have been described that lacked eyes and nose completely and suffered brain damage. The *Small eye* and *Aniridia* genes were cloned by Walther and Gruss (1991) and Ton et al. (1991), respectively, and correspond to the highly conserved *Pax6* gene. The *Pax6* homolog of *Drosophila* was cloned by Quiring et al. (1994) and surprisingly turned out to correspond to the *eyeless* (*ey*) gene of Hoge. The fact that small eye, aniridia, and eyeless are mutations in homologous genes suggested to me that *Pax6* might be a master control gene specifying eye development in both vertebrates and insects.

To test this hypothesis I decided to construct a *Pax6* gain-of-function mutation to express *Pax6* ectopically in an attempt to induce ectopic eye structures. It is relatively easy to abolish eye formation but more difficult to induce an eye ectopically. Two of my collaborators, Georg Halder and Patrick Callaerts, used the yeast transcription factor gal4 to drive *eyeless* cDNA into imaginal discs other than the eye disc (Fig. 2). After several months of failure, they succeeded in inducing ectopic eye structures on the antennae, legs, and wings, which made the front page of the *New York Times* with an article titled »Scientists Out Do Hollywood.« Callaerts later showed by recording electroretinogrammes that some of the ectopic eyes on the antennae are fully functional.

Subsequently, we also tested the mouse *Pax6* gene in *Drosophila* and showed that it is capable of inducing ectopic eyes in *Drosophila* (Fig. 3). These eyes are, of course, *Drosophila* eyes and not mouse eyes, because we have only exchanged the main switch to trigger eye development and all of the other genes required for forming an eye (which we estimate to be $\approx 2,000$) are provided by the *Drosophila* host.

These experiments lead to the conclusion that *Pax6* is a master control gene on the top of the genetic cascade leading to eye morphogenesis and that this master switch can initiate eye development both in insects and mammals.

Pax6 encodes a gene regulatory protein with two DNA binding domains – a paired domain as well as a homeodomain. The various *Pax* genes found in mice and flies clearly illustrate the principle of evolutionary tinkering (Jacob 1977). The nine members of the gene family did not arise independently *de novo* but rather by recombination of bits and pieces of preexisting genes like paired domains, octapeptides,

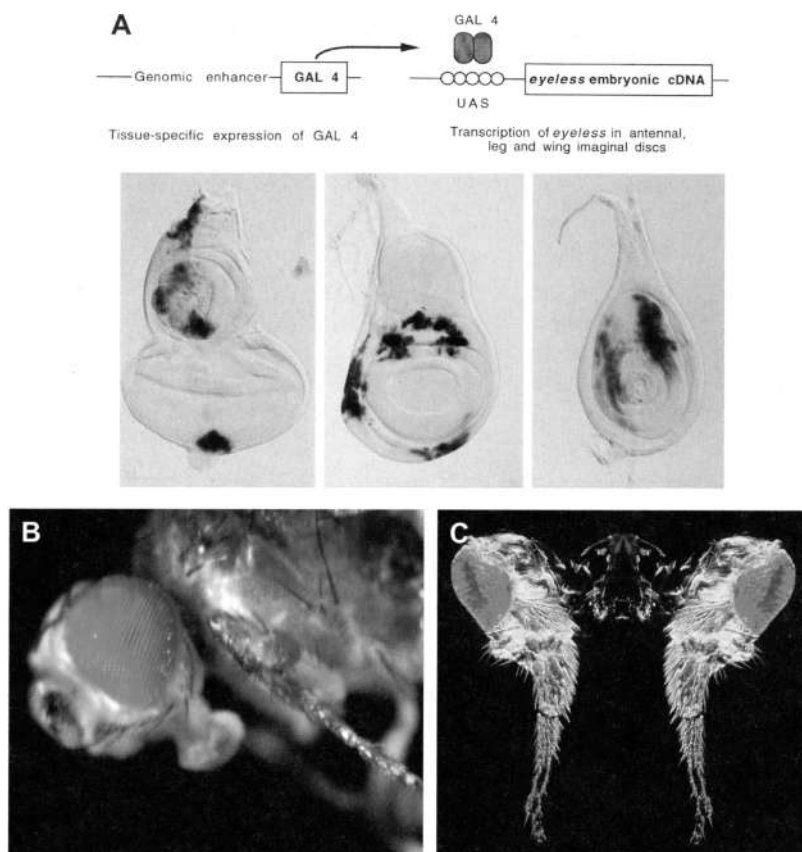


Figure 2: Targeted expression of *eyeless* and *twin of eyeless* and induction of ectopic eyes in *Drosophila* (Halder et al. 1995). (A) Targeted expression of *ey* cDNA using a genomic enhancer to induce the *gal4* transcription factor in various imaginal discs. Gal4 binds to the upstream activating sequences (UAS) and drives the expression of *ey* into the respective areas of eye-antennal, wing, and leg discs. (B) Ectopic eyes induced by *eyeless* (*ey*). (C) Ectopic eyes induced by *twin of eyeless* (*toy*). Courtesy of Urs Kloter and Georg Halder.

homeodomains, and parts thereof. *Pax6* has a paired domain and a homeodomain but lacks the octapeptide motif. Its nearest relatives are *Pax2*, *5*, and *8*, which have a paired domain plus an octapeptide, but only a partial homeodomain consisting of the N-terminal arm and the first α -helix. It will be interesting to identify their last common precursor, which may still exist in some cnidarians (see later discussion).

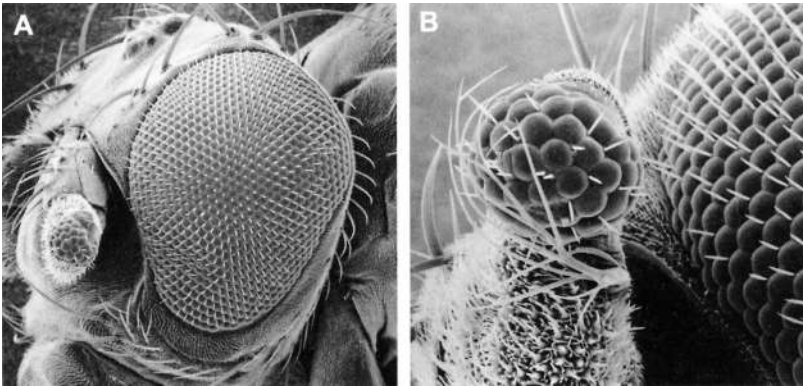


Figure 3: Ectopic *Drosophila* compound eye induced on the antenna by targeted expression of the mouse *Small eye* (*Sey*) (= *Pax6*) gene. (A) Overview. (B) Higher magnification. Scanning electron micrograph (REM Laboratory, University of Basel).

Decyphering the Eye Genetic Program

Because the first spontaneous *ey* mutants, *ey*² and *ey*^R, are caused by transposon insertions (Quiring et al. 1994) they are not null mutations. They still produce a normal transcript in parts of the nervous system, but they fail to be expressed in the eye disc because of the fact that the two transposons in *ey*² and *ey*^R have inserted into an eye-specific enhancer located in the first intron of the gene (Hauck et al. 1999). Therefore, we induced a true null mutation in *ey* by mutagenesis with ethylmethanesulfonate (Flister et al. unpublished data; Punzo et al. 2004). However, this null mutation only removed the compound eyes in most flies and not the ocelli, suggesting the presence of a second gene with partially redundant function. Indeed, in collaboration with M. Busslinger we discovered a second *Pax6* homolog in *Drosophila* (Czerny et al. 1999) which we designated *twin of eyeless* (*toy*). This second gene is only found in holometabolous insects, *Drosophila*, and silkworms but not in the more primitive hemimetabolous insects, like grasshoppers or springtails. Null mutations in *toy* have a much more severe phenotype (Flister et al. unpublished data; Kronhamn et al. 2002), they are essentially headless, forming only the proboscis and the thorax but no antennae and head structures, except two spheres of eye facets found back in the thorax, which presumably reflect the residual activ-

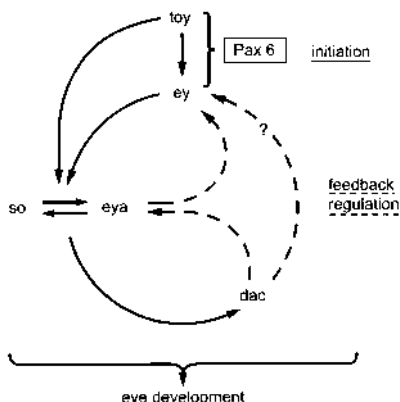


Figure 4: Gene regulatory network controlling eye determination in *Drosophila*.

ity of the *ey*⁺ gene, which is still present in these flies (Punzo et al. 2004). Ectopic expression of *toy* is also capable of inducing ectopic eyes (Fig. 2B). My analysis indicates that *ey* and *toy* arose from a duplication and diverged in function, so that *toy* acts upstream of *ey* and activates it in normal development leading to the intercalation of an additional gene into the eye morphogenetic pathway (see later discussion).

We also identified direct target genes of *ey* in particular *sine oculis* (*so*), a homeobox gene that is also conserved in both vertebrates and invertebrates (Niimi et al. 1999). The *so* enhancer contains five binding sites for *toy* and *ey* (Punzo et al. 2002) all of which are recognized by TOY protein, whereas EY binds only to two of them. All five binding sites have to be mutated to abolish enhancer activity completely. So protein forms a heterodimer with *eyes absent* (*eya*) a protein phosphatase. The *so* gene alone, when ectopically expressed, does not induce ectopic eyes; however, in combination with *eya* eye structures are induced, but less efficiently than by *ey*, and there is a positive feedback loop from *so/eya* to *ey* (Fig. 4).

Following these studies on single genes, I undertook a more global approach to decipher the entire eye morphogenetic pathway of *Drosophila* and eventually compare it to that of the mouse. My colleagues and I have begun to use DNA microarrays to determine the patterns of gene expression at consecutive stages of eye development. By comparing the genes expressed in a leg disc in which an eye field has been

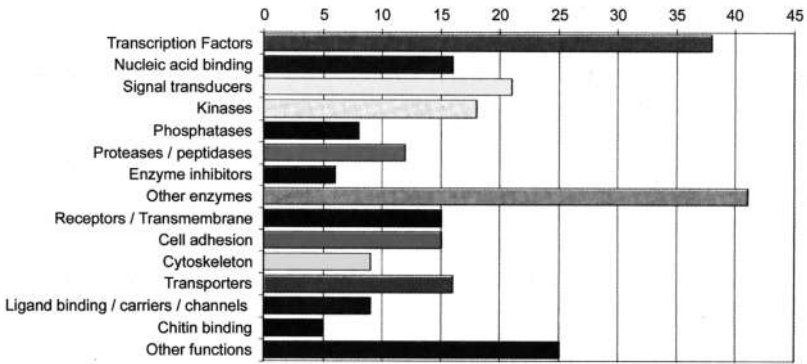


Figure 5: Repartition of *ey*-induced genes in third instar larval leg discs in which an eye morphogenetic field is induced (Michaut et al. 2003).

induced with those in a normal leg disc, we have determined the earliest genes expressed on the top of the genetic hierarchy. The large fraction of these early genes are transcription factors (Fig. 5), whereas very few of the structural genes are expressed at this early stage (Michaut et al. 2003).

Darwin and the Problem of Eye Evolution

Charles Darwin in *The Origin of Species* (1882) had great difficulties with eye evolution and devoted an entire chapter to it, »Difficulties of the Theory,« in which he discusses »organs of extreme perfection and complication«:

To suppose that the eye with all its inimitable contrivances for adjusting the focus to different distances, for admitting different amounts of light and for the correction of spherical and chromatic aberration, could have been formed by natural selection, seems, I freely confess, absurd in the highest degree.

But then he continues:

Reason tells me, that if numerous gradations from a simple and imperfect eye to one complex and perfect can be shown to exist, each grade being useful to its possessor, as is certainly the case; if further, the eye ever varies and the variations be inherited, as is likewise certainly the case; and if such variations should be useful to any animal under changing conditions of life, then the difficulty of believing that a perfect and complex eye could be formed by natural selection, though insuperable by our imagination, should **not** be considered as subversive of the theory.

This pushes the question of eye evolution back to the problem of how the first primitive eye, the prototype, evolved. The evolution of an eye prototype would seem to be a highly improbable stochastic event, because selection can only work after the various components are assembled into a prototype that is at least partially functional as a photoreceptor organ. »The simplest organ which can be called an eye consists of an optic nerve, surrounded by pigment-cells and covered by translucent skin, but without any lens or other refractive body.«

Such primitive eyes are found, for example, in certain flatworms. Hesse (1897) described the eyes of *Planaria torva*, which consists of three photoreceptor cells and a single pigment cell only. There is a planarian species *Polycelis auricularia*, which has multiple eyes with one photoreceptor cell and one pigment cell only, which corresponds exactly to the Darwinian prototype (Fig. 1D).

For the present discussion we adopt Darwin's definition of an eye as an organ consisting of at least two different cell types, photoreceptor cells and pigment cells. The »eyes« of protists are organelles (not organs) formed within a single cell and arise by the assembly of molecules within a cell rather than by the assembly of different cells, which is a fundamental difference with respect to the genetic control of morphogenesis.

Because the evolution of a prototypic eye is a highly improbable stochastic event that is not driven by selection, the hypothesis of a polyphyletic origin of the eyes, arising 40 to 65 times independently, is extremely unlikely and incompatible with Darwin's ideas. Furthermore, all three major eye types (the camera-type, the compound eye, and the mirror eye) are found within the same class of molluscs, in the bivalvia, making an independent evolutionary origin even more unlikely.

Our finding of the same master control gene for eye development in mammals and insects suggested that *Pax6* might be the universal master control gene in both vertebrates and invertebrates. To test this hypothesis we tested the mouse *Pax6* gene in *Drosophila* and reciprocally the *Drosophila ey* and *toy* genes in *Xenopus* (Onuma et al. 2002). As shown in Figures 3 and 6 in both cases ectopic eye structures can be induced, suggesting that the genetic cascade leading to eye formation is similar in vertebrates and invertebrates. Furthermore, not only *Pax6* is highly conserved in eye development, but also *so*, the direct target gene of *Pax6* is involved in morphogenesis of the vertebrate and invertebrate eyes, suggesting that the camera-type eye and the compound eye share similar eye morphogenetic programs. However, we have also found clear differences, for example, the *Retina homeobox* gene (*Rx*) (Mathers et al. 1997) is expressed in the retina of the mouse, but not in *Drosophila*, where it is expressed in the brain only (Eggert et al. 1998). Nevertheless, the eye morphogenetic programs of mice and flies are so similar that they suggest a common evolutionary ancestry.

Monophyletic Origin of the Different Eye Types in Bilateria

True *Pax6* homologs (orthologs) have been found in all bilateria analyzed so far, ranging from planarians to humans, including *C. elegans*. This nematode has lost its eyes because it lives underground, but it has retained its *Pax6* gene. The reason for retaining the *Pax6* gene lies in the pleiotropic function of *Pax6*, which specifies not only the eye but also the nose and parts of the brain. Therefore, there is selective pressure to maintain *Pax6* despite of the reduction of the eyes. This interpretation is supported by the fact that *C. elegans* has lost its rhodopsin gene(s); because the only function of rhodopsin is light reception, there is no selective pressure to maintain the rhodopsin gene. For *C. elegans*, the squid (*Loligo*), the seasquirt (*Phallusia*), and the lancelet (*Amphioxus*) we have shown that their *Pax6* genes are capable of inducing ectopic eyes in *Drosophila*. The only exception to this rule are the two *Pax6* genes of the planarian (*Dugesia tigrinina*), which apparently have diverged too much. However, we also have obtained functional genetic evidence that *Pax6* and *six (so)* genes are also involved in eye morphogenesis in *Dugesia*.

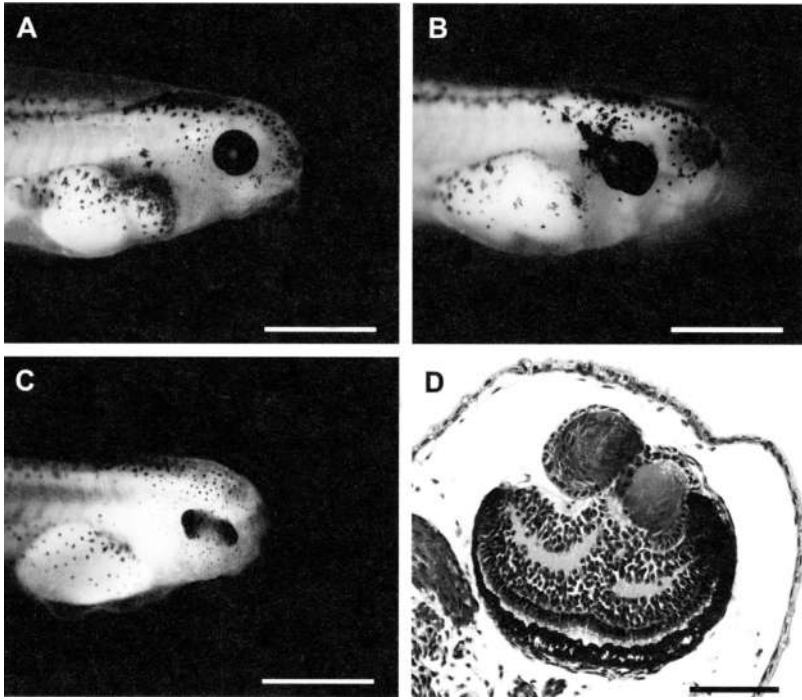


Figure 6: Induction of ectopic eye structures in *Xenopus* embryos by injection of *Drosophila ey* and *toy* mRNA at the two-cell stage (Onuma et al. 2002). (A) Control embryo noninjected. (B) Embryo injected with 0.5 ng *ey* mRNA showing expansion of the retinal pigment epithelium. (C) Embryo injected with 2 ng *toy* mRNA showing a duplication of the retina. (D) Cross-section of an embryo injected with 0.25 ng *ey* mRNA showing a duplication of the lens and retina.

By injection of double-stranded RNA (RNA interference) against *sine oculis* we have been able to prevent eye regeneration in *Dugesia* (Pineda et al. 2000). We have also developed methods for electroporation of planarians *in toto* that allowed us to apply a different strategy for testing the genetic control of eye development by *Pax6*. If *Pax6* is highly conserved, it is to be expected that its target sites are also conserved to specify the same genetic circuitry. Therefore, we analyzed the *Pax6*-responsive P3-enhancer, which is found in front of the rhodopsin genes ranging from fruitflies to humans (Berghammer et al. 1999). By fusing three copies of P3 to a minimal promoter driving green fluorescent protein (GFP) Horn and Wimmer (2000) have constructed transposon-

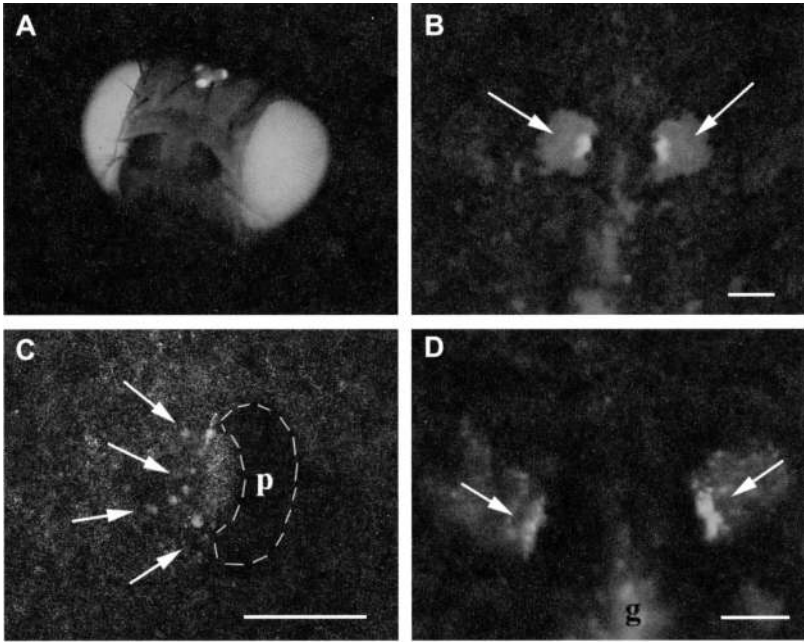


Figure 7: Planarians transformed by electroporation with GFP constructs with the *Pax6*-responsive P3-enhancer in the hermes transposon vector of Horn et al. (2000). (A) Transgenic *Drosophila* control. (B) Transgenic planarian line with homogeneously green eyes 12 months after electroporation (after González-Estévez et al. 2003). (C) Transformed neoblasts turn green as they enter the eye field. (D) Mosaic eyes in which a large fraction of the original photoreceptor cells are replaced by transformed neoblasts.

derived vectors that function in a wide variety of organisms. Transgenic animals generally express the P3-GFP construct in their eyes (Fig. 7A).

By electroporation we transformed the totipotent neoblasts with the P3-GFP construct. These stem cells are capable of replacing somatic cells as well as germ cells, which are turning over. When the transformed neoblasts enter the eye region, they begin to express the GFP marker and gradually become photoreceptor cells until the eyes of the holt are green fluorescent (Fig. 7C and D). Neoblasts can also colonize the gonad and become germ cells, which allowed us to obtain F1 progeny with completely green eyes (Fig. 7B) and to establish stable transgenic lines from them. These results indicate that not only *Pax6* is conserved but also its target sites and the genetic circuits leading to eye morphogenesis.

The functional conservation of *Pax6* and *so* from planarians to humans strongly suggests a monophyletic origin of the bilaterian eye. Because transcription factors can control the expression of any target gene (provided it contains the appropriate gene regulatory elements), there are no functional constraints linking *Pax6* to eye development. Therefore, the link between *Pax6* and *so* to eye development must simply be a consequence of a common evolutionary history. Therefore, I have proposed that all bilaterian eye types go back to a single root, a Darwinian prototype as, for example, found in planarians (Fig. 1; Hesse 1897).

Starting from this prototype, selection has generated increasingly more performant eyes and that the various eye types arose by divergent, parallel, and convergent evolution (Fig. 8).

From Unicellular Photoreceptors to Multicellular Eyes

In cnidarians eyes are found only sporadically in some Hydrozoans, like *Cladonema* (Fig. 9) and in box-jellyfish (cubozoans) like *Tripedalia*, and we do not know whether other jellyfish have lost their eyes in the course of evolution or whether they never acquired them. Neither in corals (Miller et al. 2000; Plaza et al. 2003) nor jellyfish (Gröger et al. 2000; Kozmik et al. 2003; Sun et al. 1997, 2001) a bonafide *Pax6* gene has yet been found, but in *Tripedalia* Kozmik et al. (2003) have described a *PaxB* gene that might be an ancestral gene of *Pax6*. The paired domain of *PaxB* of *Tripedalia* shows 82% sequence identity to mammalian *Pax2* and 75% to *Pax6*, and it also contains an octapeptide like *Pax2*, but it has a complete homeobox like *Pax6*, whereas *Pax2* retains only the N-terminal part of the homeobox. This indicates that *PaxB* is structurally a mosaic between *Pax2* and *Pax6*, which is also supported by functional studies. In *Drosophila* *PaxB* can partially complement *Pax2* mutants (*sparkling*) and also induce ectopic eyes like *Pax6* (Kozmik et al. 2003). Therefore, we consider *PaxB* to be a candidate ancestral gene of both *Pax6* and *Pax2*. In the hydrozoan *Cladonema*, Stierwald et al. (2004) have obtained evidence that the *six1* and *six3* homologs are both involved in eye regeneration (Fig. 9), the same genes that are also controlling eye development in vertebrates, which lends strong support for the hypothesis of a monophyletic origin of the eye.

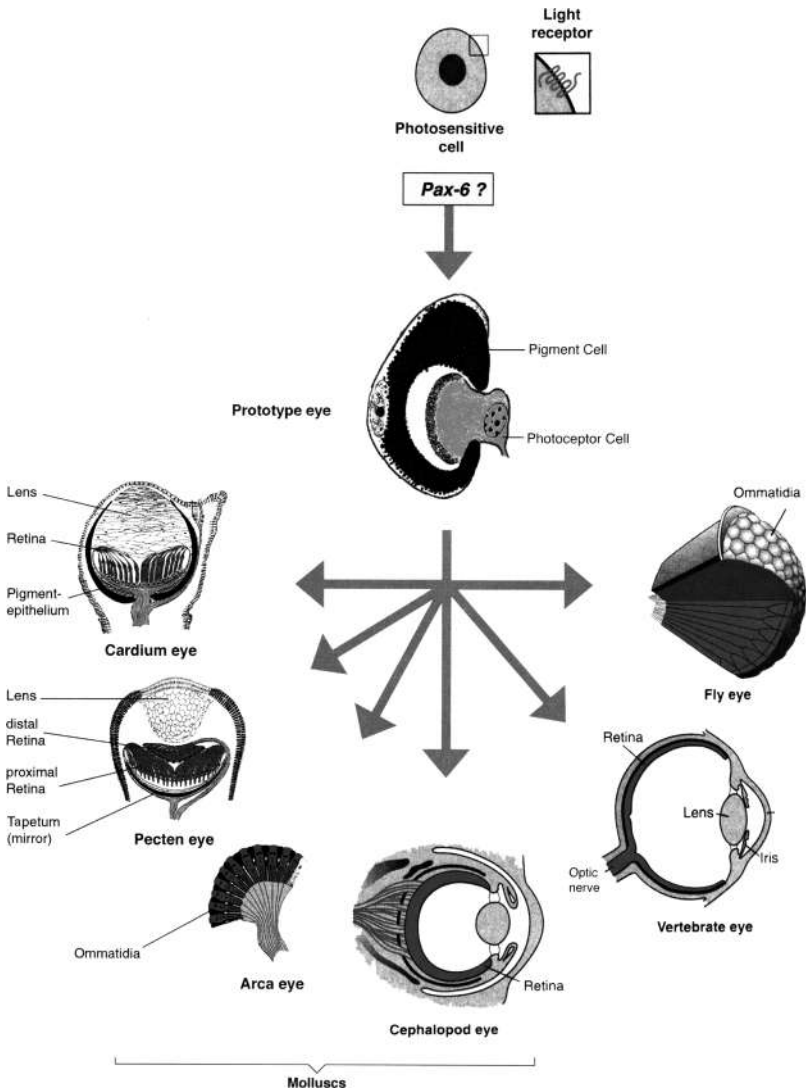


Figure 8: Hypothetical evolution of photosensitive cells containing rhodopsin as a light receptor and monophyletic evolution of the various eye types. The eye prototype consisting of a photoreceptor cell and a pigment cell is assembled under the control of *Pax6* (after Gehring and Ikeo 1999).

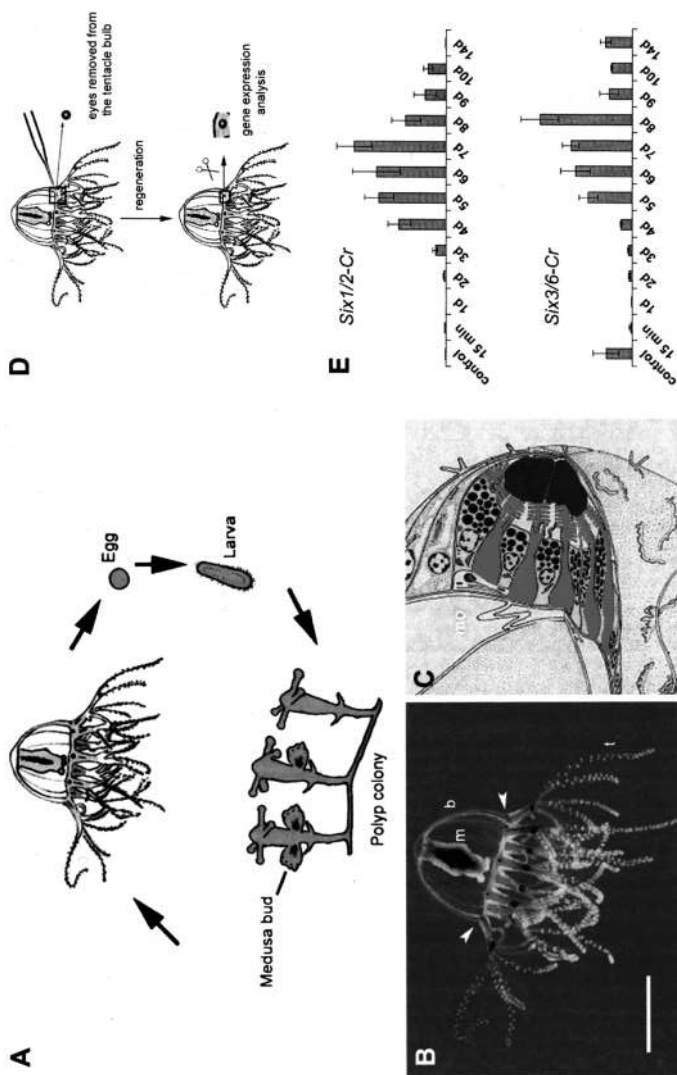


Figure 9: Life cycle and eye structure and regeneration of the eyes in the hydrozoan jellyfish *Cladonema* (after Stierwald 2004). (A) Life cycle. (B) Location of the eyes at the base of the tentacle (arrowheads). (C) Eye structure: photoreceptor cells (red), pigment cells (yellow), lens cells (blue). (D) Removal of an eye from the tentacle bulb and eye regeneration. (E) Gene expression analysis by quantitative PCR; both *six* 1 and 3 homologs are induced.

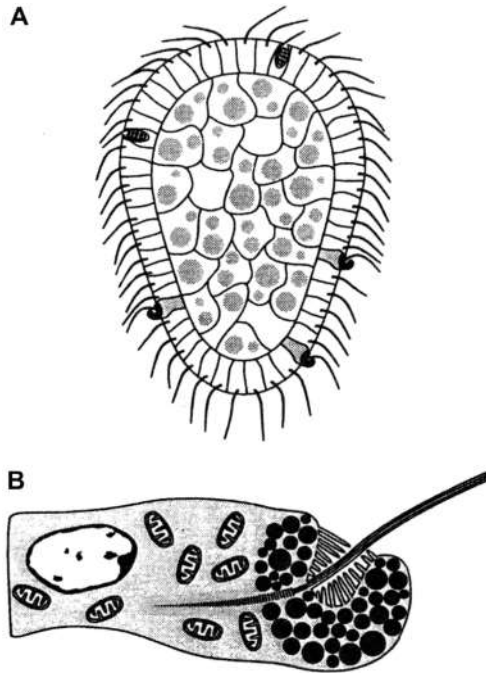


Figure 10: Unicellular photoreceptors in the planula larva of the box jellyfish *Tripedalia* (after Nordström et al. 2003). (A) Planula larva. (B) Unicellular photoreceptor with pigment granules, microvilli, and a flagellum.

In *Tripedalia* the transition from unicellular eye organelles to multicellular eye organs can be observed. The planula larva of *Tripedalia* forms unicellular photoreceptors scattered over the epidermis (Fig. 10), whereas the adult jellyfish forms elaborate multicellular eyes (Nordström et al. 2003). These unicellular photoreceptors contain both the putative photosensory microvilli and the shielding pigment granules within the same cell, which also carries a motor cilium that enables the larva to show phototactic behavior. These unicellular photoreceptors closely resemble some unicellular photosensitive protists. We propose that in the course of evolution these unicellular photoreceptors has duplicated and differentiated into at least two different cell types, photoreceptor cells and pigment cells, as they are found in adult *Tripedalia* jellyfish and in the Darwinian prototype eyes of planarians (*Polycelis auricularia*).

The Evolution of Eyes and Brain

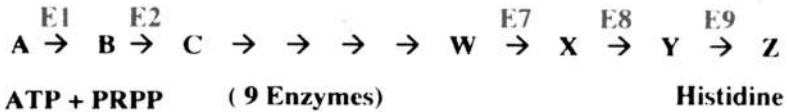
Because the eye in vertebrates develops as an evagination of the brain and is part of the brain it has generally been assumed that brain evolved before the eye. Furthermore, the detailed visual processing occurs in the brain rather than in the eye, that is, we actually see with the brain. Nevertheless, we have proposed that the eye came first in evolution (Gehring and Ikeo 1999). The sensory organs are gathering information, whereas the brain is an information-processing organ, similar to a computer. If no information is acquired, there is no need for an elaborate information-processing organ. As more information is acquired by the eyes and other sensory organs, the brain evolves in parallel to process this information and transmit it to the effector organs, like the muscles. This is supported by the fact that both the eyes (and nose) and parts of the brain are specified by *Pax6*. Evidence for the idea that the eyes evolved first, comes from the study of jellyfish like *Cladonema*, which have elaborate eyes but no brain. The eyes are located at the base of the tentacles (Fig. 9) and transmit their response directly to the muscles without processing by the brain. Of course, we cannot rule out the possibility that *Cladonema* has lost its brain, but it seems unlikely for a free-living pelagic animal to lose its brain in the course of evolution. Therefore, I consider it likely that the eyes evolved first, before the brain. This point of view is supported by the observation that the unicellular photoreceptor organelles in *Tripedalia* larvae have evolved in the apparent absence of an elaborate nervous system (Nordström et al. 2003).

Retrograde and Intercalary Evolution

Horowitz (1945) considered the evolution of biosynthetic pathways, which are in general linear, leading from the original substrate(s) over many successive enzymatic steps to the final biosynthetic product. A rather simple Darwinian solution to the problem of linearity was found by Horowitz by assuming a retrograde mode of evolution (Fig. 11A). Originally the respective organism could not synthesize the respective product and had to take it up from the environment. When the supply in the environment was exhausted, those organisms whose

A Retrograde Evolution of Biosynthetic Pathways

Histidine Biosynthesis



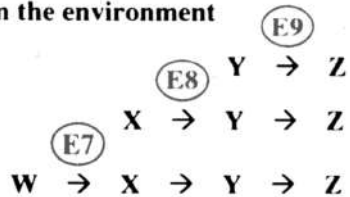
Evolution

(0) Histidine has to be taken up from the environment

(1) Step

(2) Step

(3) Step



B Intercalary Evolution of Morphogenetic Pathways

Eye Morphogenesis

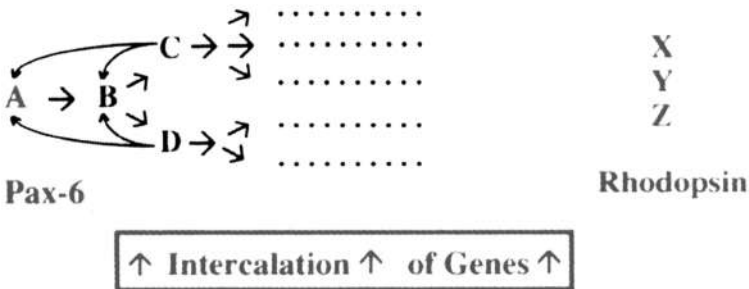


Figure 11: Models for the evolution of biosynthetic and morphogenetic pathways. (A) Retrograde evolution of biosynthetic pathways (after Horowitz 1945). (B) Intercalary evolution of the eye morphogenetic pathway (after Gehring and Ikeo 1999).

had the last enzyme in the pathway could make use of the immediate precursor and convert it to the final product, until the supply of the immediate precursor was also exhausted. Then only those organisms could survive that possessed the second last enzyme and so on until the biosynthetic pathway was completely established.

For the evolution of morphogenetic pathways, like eye morphogenesis, I propose a mechanism of intercalary evolution (Fig. 11B). The eye prototype, which is due to a purely stochastic event that assembles a photoreceptor and a pigment cell into a visual organ, requires the function of at least two classes of genes, a master control gene, *Pax6*, and the structural genes encoding on rhodopsin, for instance, the top and the bottom of the genetic cascade. Starting from such a prototype increasingly more sophisticated eye types arose by recruiting additional genes into the morphogenetic pathway. At least two mechanisms of recruitment are known that lead to the intercalation of additional genes into the genetic cascade. These mechanisms are gene duplication and enhancer fusion. A case of gene duplication can be illustrated with *ey* and *toy*: More primitive insects as spring tails and grasshoppers possess a single *Pax6* gene, whereas *Drosophila ey* and *toy* genes have functionally diverged in evolution, and the positive autocatalytic feedback loop found in *Pax6* has evolved into a heterocatalytic loop by which *toy* activates *ey*, leading to the intercalation to *ey* underneath *toy* into the morphogenetic pathway. The second mechanism, enhancer fusion, has been described in lens proteins mainly by Piatigorsky and Wistow (1989) and can also be illustrated by the *Drosophila* lens protein drosocrystallin (Janssens and Gehring 1999). This protein is not conserved in evolution and found only in insects but not in vertebrates. The analysis of the amino acid sequence of the drosocrystallin protein clearly indicates that it belongs to the family of cuticle proteins. By fusing it to a lens-specific enhancer, the *Drosocrystallin* gene has been recruited into the eye developmental pathway. In some cases the recruitment need not be associated with gene duplication, if the gene can still fulfill its original function; in other cases the recruitment may be accompanied by a gene duplication leading an active gene copy behind to ensure the original function of the gene.

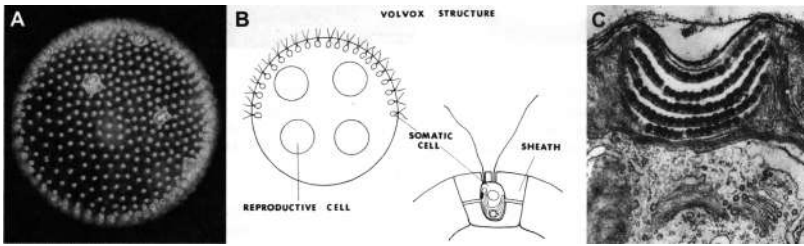


Figure 12: The colonial organization of *Volvox* and the structure of its photoreceptor organelle located in the chloroplast of *Eudorina*. (A) Colonial organization. (B) Structure of a single flagellate (somatic cell). (C) Ultrastructure of the photoreceptor organelle in the chloroplast (thylakoid membranes) of *Eudorina californica* (after Grell 1973).

The Origin of Photoreceptor Cells in Metazoa

For the origin of metazoan photoreceptor cells I have put forward two hypotheses: one based on cell differentiation and a more speculative model based on a symbiosis.

The more conventional idea is to assume that metazoa arose from a colony of flagellate-like cells like *Volvox* and *Eudorina* (Fig. 12) in which all of the cells originally possessed a photoreceptor organelle, an »eyespot« that transmits its signals to the flagella and allows for phototactic behavior. Subsequent cellular differentiation would lead to an arrangement as found in the *Tripedalia* larva (Fig. 10), which possesses unicellular photoreceptors scattered among the other ciliated cells in the ectoderm of the larva. The photoreceptor cells not only possess microvilli, presumably containing the visual pigment, but also melanin pigment granules shielding the basal side of the cell, as well as a cilium, which is thought to be used for steering of the larva toward or away from the light source. The next step would involve the differentiation of the unicellular photoreceptors into two cell types, a photoreceptor cell and a pigment cell and their assembly into a prototypic eye.

The alternative symbiont hypothesis is based on the observation that the eye organelle in flagellates like *Volvox* or *Chlamydomonas* is located in the chloroplast, suggesting that light perception goes all the way back to cyanobacteria that became integrated into eukaryotic cells as chloroplasts. Indeed, the sequencing of the complete genome of the cyanobacterium *Nostoc* has revealed the presence of a prote-

orhodopsin gene (Kaneko et al. 2001). A proteorhodopsin gene has also been found in the dinoflagellate *Pyrocystis* and shown to be controlled by the internal clock (Okamoto and Hastings 2003). Another observation supporting the symbiont hypothesis comes mainly from the work of Greuet (1965, 1969), who described the photoreceptor organelles of some dinoflagellates like *Erythropsis* and *Warnovia*, which are as elaborate as the human eye but assembled in a single cell (Fig. 13). They consist of a cornea-like surface layer, a lens-like structure, a retina-like structure with stacked membranes (or microvilli), and a pigment cup, all in a single cell. Because dinoflagellates are common symbionts in corals, sea anemones, and other cnidarians, dinoflagellates might have transferred the genes required for photoreception to the cnidarians, which would also explain their sporadic occurrence in different groups of cnidarians.

This symbiont hypothesis, which I call the Russian doll model, assumes that light sensitivity first arose in cyanobacteria, the earliest known fossils on Earth. These cyanobacteria were subsequently taken up by eukaryotic red algae as primary chloroplasts surrounded by an outer and inner bacterial membrane separated by a proteoglycan layer. Subsequently, the red algae were taken up by dinoflagellates as secondary chloroplasts surrounded by an additional third membrane coming from the primary red algal host. In some species of dinoflagellates like *Erythropsis* and *Warnovia*, which do not have any chloroplasts, these secondary chloroplasts may have been transformed into elaborate photoreceptor organelles as suggested by Greuet. Because dinoflagellates (also called zooxanthellae) are commonly found as symbionts in cnidarians, dinoflagellates may have transferred their photoreceptor genes to cnidarians. This is the most speculative step in the Russian doll model, but it can be tested by looking for dinoflagellate genes in the cnidarian genomes. These two hypotheses, the cellular differentiation and the Russian doll model, are not mutually exclusive and are subject to further investigations.

Acknowledgments

This article is based on the Wilhelmine E. Key plenary lecture given at the 2004 Annual Meeting of the American Genetic Association, »Genomes and Evolution 2004,« Pennsylvania State University, State College, PA, June 17-20, 2004.

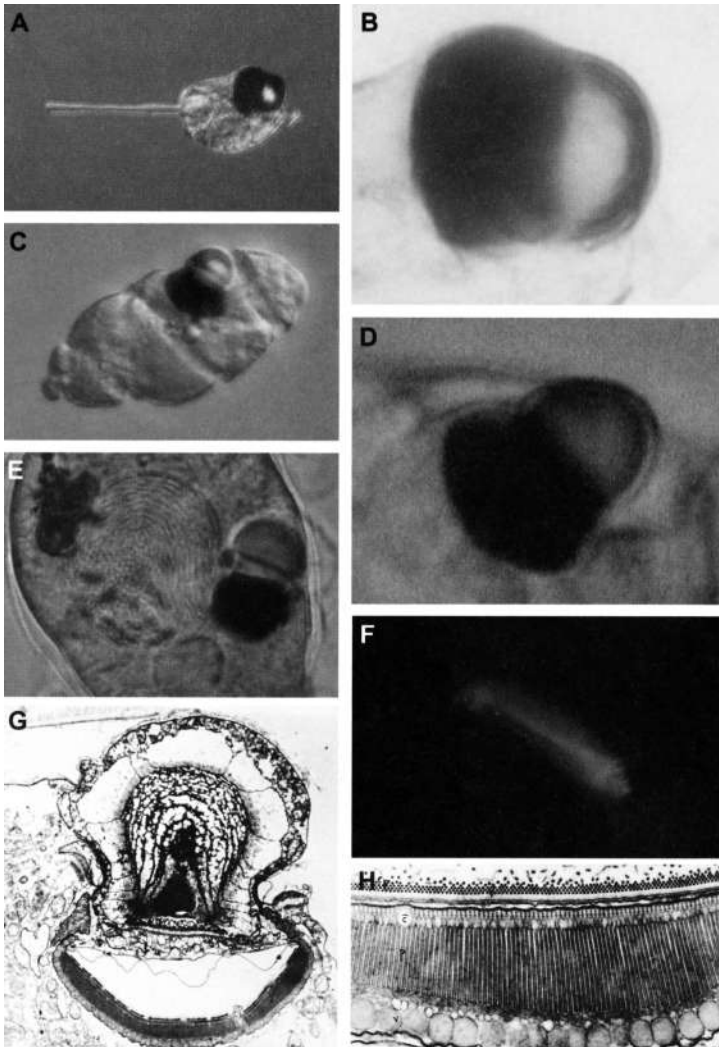


Figure 13: Eye organelle of the unicellular dinoflagellates *Erythroopsis* and *Warnovia*. (A) *Erythroopsis*. (B) Eye organelle of *Erythroopsis*. (C) *Warnovia*. (D) Eye organelle of *Warnovia*. (E) Nucleus and eye organelle of *Warnovia*. (F) Birefringence, the retina-like structure detected in polarized light in *Warnovia*. (G) Ultrastructure of the eye organelle of *Warnovia*. (H) Ultrastructure of the retina-like structure with stacked membranes and large pigment granules. A–F courtesy of Makiko Seimiya and Jean and Colette Febvre; G–H from Greuet 1969.

References

- Berghammer AJ, Klingler M, and Wimmer EA, 1999. A universal marker for transgenic insects. *Nature* 402:370-371.
- Czerny T, Halder G, Kloter U, Souabni A, Gehring WJ, and Busslinger M, 1999. Twin of eyeless, a second Pax-6 gene of *Drosophila*, acts upstream of eyeless in the control of eye development. *Mol Cell* 3:297-307.
- Darwin C, 1882. The origin of species by means of natural selection, 6th ed. London: John Murray; 143-146.
- Eggert T, Hauck B, Hildebrandt N, Gehring WJ, and Walldorf U, 1998. Isolation of a *Drosophila* homolog of the vertebrate homeobox gene Rx and its possible role in brain and eye development. *Proc Natl Acad Sci USA* 95:2343-2348.
- Gehring WJ and Ikeo K, 1999. Pax6: mastering eye morphogenesis and eye evolution. *Trends Genet* 15:371-377.
- González-Estévez C, Momose T, Gehring WJ, and Saló E, 2003. Transgenic planarian lines obtained by electroporation using transposon-derived vectors and an eye-specific GFP marker. *Proc Natl Acad Sci USA* 100:14046-14051.
- Grell KG, 1973. Protozoology. New York: Springer Verlag; 314.
- Greuet C, 1965. Structure fine de l'ocelle d'*Erythropopsis pavillardii* Hertwig, pteridinien Warnowiidae Lindemann. *CR Acad Sci (Paris)* 261:1904-1907.
- Greuet C, 1969. Anatomie ultrastructurale des Ptéridiniens Warnowiidae en rapport avec la différenciation des organites cellulaires. PhD diss., Université de Nice.
- Gröger H, Callaerts P, Gehring WJ, and Schmid V, 2000. Characterization and expression analysis of an ancestor-type Pax gene in the hydrozoan jellyfish *Podocoryne carnea*. *Mech Dev* 94:157-169.
- Halder G, Callaerts P, and Gehring WJ, 1995. Induction of ectopic eyes by targeted expression of the eyeless gene in *Drosophila*. *Science* 267:1788-1792.
- Hauck B, Gehring WJ, and Walldorf U, 1999. Functional analysis of an eye specific enhancer of the eyeless gene in *Drosophila*. *Proc Natl Acad Sci USA* 96:564-569.
- Hesse R, 1897. Untersuchungen über die Organe der Lichtempfindung bei niederen Thieren. II. Die Augen der Plathelminthen. *Z Wiss Zool Band* 62:527-582.

- Hill RE, Favor J, Hogan BL, Ton CC, Saunders GF, Hanson IM, Prosser J, Jordan T, Hastie ND, and van Heyningen V, 1991. Mouse Small eye results from mutations in a paired-like homeobox-containing gene. *Nature* 354:522-525.
- Hoge MA, 1915. Another gene in the fourth chromosome of *Drosophila*. *Am Nat* 49:47-49.
- Horn C and Wimmer EA, 2000. A versatile vector set for animal transgenesis. *Dev Genes Evol* 210:630-637.
- Horowitz NH, 1945. On the evolution of biochemical syntheses. *Proc Natl Acad Sci USA* 31:153-157.
- Jacob F, 1977. Evolution and tinkering. *Science* 196:1161-1166.
- Janssens H and Gehring WJ, 1999. Isolation and characterization of drosocrystallin, a lens crystallin gene of *Drosophila melanogaster*. *Dev Biol* 207:204-214.
- Kaneko T, Nakamura Y, Wolk CP, Kuritz T, Sasamoto S, Watanabe A, Iriguchi M, Ishikawa A, Kawashima K, and Kimura T, 2001. Complete genomic sequence of the filamentous nitrogen-fixing cyanobacterium *Anabaena* sp. strain PCC 7120. *DNA Res* 8:205-213.
- Kozmik Z, Daube M, Frei E, Norman B, Kos L, Dishaw LJ, Noll M, and Piatigorsky J, 2003. Role of Pax genes in eye evolution: a cnidarian PaxB gene uniting Pax2 and Pax6 function. *Dev Cell* 5:773-785.
- Kronhamn J, Frei E, Daube M, Jiao R, Shi Y, Noll M, and Rasmuson-Lestander A, 2002. Headless flies produced by mutations in the paralogous Pax6 genes eyeless and twin of eyeless. *Development* 129:1015-1026.
- Mathers PH, Grinberg A, Mahon KA, and Jamrich M, 1997. The Rx homeobox gene is essential for vertebrate eye development. *Nature* 387:603-607.
- Mayr E, 2001. What evolution is. New York: Basic Books.
- Michaut L, Flister S, Neeb M, White KP, Certa U, and Gehring WJ, 2003. Analysis of the eye developmental pathway in *Drosophila* using DNA microarrays. *Proc Natl Acad Sci USA* 100:4024-4029.
- Miller DJ, Hayward DC, Reece-Hoyes JS, Scholten I, Catmull J, Gehring WJ, Callaerts P, Larsen JE, and Ball EE, 2000. Pax gene diversity in the basal cnidarian *Acropora millepora* (Cnidaria, Anthozoa): implications for the evolution of the Pax gene family. *Proc Natl Acad Sci USA* 97:4475-4480.

- Niimi T, Seimiya M, Kloter U, Flister S, and Gehring WJ, 1999. Direct regulatory interaction of the eyeless protein with an eye-specific enhancer in the sine oculis gene during eye induction in *Drosophila*. *Development* 126:2253-2260.
- Nordström K, Wallen R, Seymour J, and Nilsson D, 2003. A simple visual system without neurons in jellyfish larvae. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 270:2349-2354.
- Okamoto OK and Hastings JW, 2003. Novel dinoflagellate clock-related genes identified through microarray analysis. *J Phycol* 39:519-526.
- Onuma Y, Takahashi S, Asashima M, Kurata S, and Gehring WJ, 2002. Conservation of Pax6 function and upstream activation by Notch signaling in eye development of frogs and flies. *Proc Natl Acad Sci USA* 99:2020-2025.
- Piatigorsky J and Wistow GJ, 1989. Enzyme/crystallins: gene sharing as an evolutionary strategy. *Cell* 57:197-199.
- Pineda D, Gonzalez J, Callaerts P, Ikeo K, Gehring WJ, and Salo E, 2000. Searching for the prototypic eye genetic network: sine oculis is essential for eye regeneration in planarians. *Proc Natl Acad Sci USA* 97:4525-4529.
- Plaza S, De Jong DM, Gehring WJ, and Miller DJ, 2003. DNA-binding characteristics of cnidarian Pax-C and Pax-B Proteins in vivo: no simple relationship with the Pax-6 and Pax-2/5/8 classes. *J Exp Zool Part B Mol Dev Evol* 299:26-35.
- Punzo C, Seimiya M, Flister S, Gehring WJ, and Plaza S, 2002. Differential interactions of eyeless and twin of eyeless with the sine oculis enhancer. *Development* 129:625-634.
- Punzo C, Plaza S, Seimiya M, Schnupf P, Kurata S, Jaeger J, and Gehring WJ, 2004. Functional divergence between eyeless and twin of eyeless in *Drosophila melanogaster*. *Development* 131:3943-3953.
- Quiring R, Walldorf U, Kloter U, and Gehring WJ, 1994. Homology of the eyeless gene of *Drosophila* to the *Small* eye gene in mice and *Aniridia* in humans. *Science* 265:785-789.
- Salvini-Plawen L and Mayr E, 1961. In: *Evolutionary biology*, vol. 10 (Hecht MK, Steere WC, and Wallace B, eds). New York: Plenum Press; 207-263.

- Stierwald M, Yanze N, Bamert RP, Kammermeier L and Schmid V, 2004. The *Sine oculis/Six* class family of homeobox genes in jellyfish with and without eyes: development and eye regeneration. *Dev Biol* 274:70-81.
- Sun H, Rodin A, Zhou Y, Dickinson DP, Harper DE, Hewett-Emmett D, and Li WH, 1997. Evolution of paired domains: isolation and sequencing of jellyfish and hydra Pax genes related to Pax-5 and Pax-6. *Proc Natl Acad Sci USA* 94:5156-5161.
- Sun H, Dickinson DP, Costello J, and Li WH, 2001. Isolation of *Cladonema* Pax-B genes and studies of the DNA-binding properties of cnidarian Pax paired domains. *Mol Biol Evol* 18:1905-1918.
- Ton CC, Hirvonen H, Miwa H, Weil MM, Monaghan P, Jordan T, van Heyningen V, Hastie ND, Meijers-Heijboers H, Drechaler M, et al. 1991. Positional cloning and characterization of a paired box- and homeobox-containing gene from the aniridia region. *Cell* 67:1059-1074.
- Walther C and Gruss P, 1991. Pax6, a murine paired box gene, is expressed in the developing CNS. *Development* 113:1435-1449.

Paul J. Crutzen

Mein Leben mit O₃, NO_x und anderen
YZO_x-Verbindungen
(Nobel-Vortrag)¹

*Der Generation von Jamie Paul und unseren
künftigen Enkeln gewidmet, die so viel mehr
wissen werden und die das Verschwinden des
Ozonlochs feiern werden.
Ich hoffe, Ihr werdet nicht von uns enttäuscht sein!*

Der Weg zum Ozonforscher

Am 3. Dezember 1933 wurde ich als Sohn von Anna Gurk und Jozef Crutzen in Amsterdam geboren. Eine Schwester von mir lebt mit ihrer Familie immer noch dort. Ende des letzten Jahrhunderts zogen die Eltern meiner Mutter aus Ostpreußen in das Ruhrgebiet. Sie hatten deutsche und polnische Vorfahren. 1929 ging meine Mutter im Alter von 17 Jahren nach Amsterdam, um als Haushälterin zu arbeiten. Dort lernte sie meinen Vater kennen. Er stammte aus Vaals, einer kleinen Stadt im Südosten der Niederlande² an der Grenze zu Deutschland und Belgien nahe Aachen. Er starb im Jahr 1977. Er hatte Verwandte in Holland, Deutschland und Belgien. Daher erbte ich von beiden Eltern eine kosmopolitische Weltsicht. Meine Mutter lebt im Alter von 84 Jahren auch noch in Amsterdam. Sie ist geistig noch sehr wach, aber seit einigen Monaten an den Rollstuhl gefesselt. Auch wenn ich seit 1958

- 1 Copyright © The Nobel Foundation 1996. – Wir danken der Nobel-Stiftung, Stockholm, für die Genehmigung zum Druck einer deutschen Fassung des Vortrags.
- 2 Im folgenden werden die Niederlande der Einfachheit halber mit dem in Deutschland sehr gängigen »Holland« bezeichnet.

in mehreren Ländern außerhalb Hollands gearbeitet habe, bin ich doch holländischer Staatsbürger geblieben.

Im Mai 1940 wurde Holland von der deutschen Wehrmacht überfallen. Im September des gleichen Jahres kam ich in die Grundschule, die allgemein »de grote school« (die große Schule) genannt wurde. Die meisten meiner sechs Grundschuljahre fielen in den Zweiten Weltkrieg. Meine Klasse mußte zwischen mehreren Räumlichkeiten in Amsterdam wechseln, nachdem die deutsche Wehrmacht unser eigentliches Schulgebäude konfisziert hatte. Die letzten Kriegsmonate zwischen dem Herbst 1944 und dem Tag der Befreiung am 5. Mai 1945 waren besonders schrecklich. Im kalten Hungerwinter 1944/45 mangelte es erheblich an Essen und Heizmaterial. Wasser zum Trinken, Waschen und Kochen gab es nur in begrenzter Menge und während weniger Stunden am Tag, was zu sehr unhygienischen Zuständen führte. Viele starben an Hunger oder Krankheiten, auch einige meiner Klassenkameraden.

Anfang 1945 kam etwas Erleichterung, als das schwedische Rote Kreuz Essenspakete von Flugzeugen aus abwarf. Wir hießen sie willkommen, indem wir unsere rot-weiß-blauen holländischen Fahnen in den Straßen schwenkten. Natürlich hatte ich nicht die geringste Vorstellung davon, wie wichtig Schweden in meinem späteren Leben einmal werden würde. Wir hatten nur ein paar Stunden Unterricht pro Woche, aber durch die besondere Hilfe eines Lehrers konnte ich zusammen mit zwei anderen Klassenkameraden in die nächste und letzte Klasse der Grundschule versetzt werden; alle anderen Schüler verloren leider ein Jahr. Eine mehr oder weniger normale Schulerziehung war erst wieder zu Beginn des neuen Schuljahres im Herbst 1945 möglich.

Nach bestandener Aufnahmeprüfung kam ich 1946 in die »Hogere Burgerschool« (HBS, höhere Bürgerschule), eine fünf Jahre dauernde Mittelschule, die auf das Studium an der Universität vorbereitet. Im Juni 1951 beendete ich diese Schule mit den Naturwissenschaften als Hauptfächern. Aber wir mußten alle auch drei Fremdsprachen lernen: Französisch, Englisch und Deutsch. Meine Eltern waren mir beim Lernen der Fremdsprachen eine große Hilfe, meine Mutter für Deutsch und mein Vater für Französisch. In dieser Zeit zählte Chemie bestimmt nicht zu meinen Lieblingsfächern. Diese waren Mathematik und Physik, aber ich war auch sehr gut in den Fremdsprachen. Während meiner Schulzeit war ich in der Freizeit sportlich sehr aktiv: Fußballspielen, Radfahren und – meine größte Leidenschaft – Schlittschuhlaufen auf

den holländischen Kanälen und Seen. Außerdem spielte ich Schach, was in Holland als Denksport angesehen wird, las viel über Reisen in ferne Länder, über Astronomie und auch über Brücken und Tunnel.

Da ich das Abschlußexamen an der HBS mit hohem Fieber machte, waren die Noten leider nicht gut genug, um mich für ein Universitätsstipendium zu qualifizieren, das man zu dieser Zeit – nur sechs Jahre nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges und ein paar Jahre nach dem des Kolonialkrieges in Indonesien, in den viel holländisches Geld geflossen war – nicht sehr leicht bekam. Da ich meinen Eltern nicht noch vier Jahre auf der Tasche liegen wollte (mein Vater war als Kellner oft arbeitslos; meine Mutter arbeitete in der Küche eines Krankenhauses), beschloß ich, mich auf der Mittleren Technischen Schule (MTS), die heute Höhere Technische Schule (HTS) genannt wird, als Tiefbauingenieur ausbilden zu lassen. Das zweite Jahr der dreijährigen Ausbildung war ein praktisches Jahr, in dem ich ein kleines Gehalt bekam, das für etwa zwei Jahre Lebensunterhalt ausreichte.

Vom Sommer 1954 bis zum Februar 1958 arbeitete ich (mit einer 21monatigen Unterbrechung durch den Wehrdienst) im Brückenbauamt der Stadt Amsterdam. In dieser Zeit lernte ich auf einer Urlaubsreise in der Schweiz eine nette Studentin kennen, Terttu Soininen, die Finnische Geschichte und Literatur an der Universität Helsinki studierte. Ein paar Jahre später konnte ich sie davon überzeugen, mich zu heiraten. Was für eine wunderbare Wahl ich getroffen hatte! Sie war fortan der Mittelpunkt unserer fröhlichen Familie. Ohne ihre Unterstützung hätte ich den Studien und der Wissenschaft nicht so viel meiner Zeit widmen können. Nach unserer Heirat im Februar 1958 zogen wir nach Gävle, einer kleinen Stadt, etwa 200 km nördlich von Stockholm, wo ich Arbeit in einer Hochbaufirma gefunden hatte. Im Dezember desselben Jahres wurde unsere Tochter Ilona geboren. Im März 1964 bekam sie eine kleine Schwester, Sylvia. Ilona lebt heute in Boulder (Colorado) und arbeitet dort als leitende Krankenschwester. Ihr Sohn Jamie Paul ist 12 Jahre alt. Sylvia arbeitet als Marketing-Assistentin in München. Sie waren alle während der Nobel-Woche in Stockholm, Upsala und Gävle dabei. Dies war eine frohe und unvergeßliche Zeit.

Während dieser ganzen Zeit hatte ich mich nach einer akademischen Karriere gesehnt. Eines Tages, Anfang 1958, sah ich in einer schwedischen Zeitung eine Anzeige des Fachbereichs Meteorologie der Stockholm Högskola (seit 1961 Universität Stockholm), in der eine Stelle als Computerprogrammierer angeboten wurde. Obwohl ich nicht die

geringste Erfahrung im Programmieren hatte, bewarb ich mich auf diese Stelle und hatte das große Glück, unter vielen Bewerbern ausgewählt zu werden. Am 1. Juli 1959 zogen wir nach Stockholm, und ich begann mit meinem zweiten Beruf. Zu dieser Zeit waren das Meteorologische Institut der Universität Stockholm (MISU) und das angegliederte Internationale Meteorologische Institut (IMI) weltweit an der Spitze der meteorologischen Forschung, und viele hervorragende Wissenschaftler arbeiteten längere Zeit in Stockholm. Nur ein Jahr vorher war der Gründer des Instituts, Prof. Gustav Rossby, einer der größten Meteorologen, plötzlich gestorben. Die Nachfolge trat Dr. Bert Bolin an, ebenfalls ein berühmter Meteorologe, der sich mittlerweile als Direktor des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) »zur Ruhe gesetzt« hat. In Stockholm gab es zu dieser Zeit die schnellsten Computer der Welt (BESK und sein Nachfolger FACIT).

Ich arbeitete bis 1966 hauptsächlich an meteorologischen Projekten, mit Ausnahme einer Teilnahme an einer Feldmeßkampagne zur Messung von leuchtenden Nachtwolken in Nordschweden, die von Dr. Georg Witt geleitet wurde und für die ich einige Programme schrieb. Vor allem war ich damit beschäftigt mitzuhelfen, die ersten numerischen (barotropischen) Wettervorhersagemodelle zu entwickeln und einzusetzen. Für einen guten Freund, Hilding Sundquist, der jetzt Professor am MISU ist, programmierte ich ein Modell für tropische Zyklone. Damals war Programmieren eine besondere Kunst. Höhere allgemeine Computersprachen wie ALGOL oder FORTRAN waren noch nicht entwickelt, so daß alle Programme in Maschinensprache geschrieben werden mußten. Man mußte sich außerdem vergewissern, daß alle Rechenschritte Werte im Bereich $-1 \leq x < 1$ ergaben, d. h. alle Gleichungen mußten so skaliert werden, daß die Werte in diesem Bereich blieben; andernfalls hätten die Rechnungen falsche Resultate ergeben.

An einer Universität zu arbeiten hatte als großen Vorteil, daß ich einige Vorlesungen besuchen konnte, die an ihr angeboten wurden. So konnte ich 1963 die Voraussetzungen für den Abschluß »philosophie kandidat« (etwa dem Diplom entsprechend) erfüllen, mit den Fächern Mathematik, mathematische Statistik und Meteorologie. Leider konnte ich damals weder Physik noch Chemie studieren, weil das die Teilnahme an sehr zeitintensiven Praktika erfordert hätte. So wurde ich ein reiner Theoretiker. Dennoch fühlte ich mich immer zu experimentellen Arbeiten hingezogen, die ich in späteren Jahren als Direktor am National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado

(1977-1980), und am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz (seit 1980) stark unterstützt habe.

Da ich an einem meteorologischen Forschungsinstitut arbeitete, war es ganz natürlich, daß ich ein meteorologisches Thema für meine »philosophie licentiat thesis« (vergleichbar mit einer Dissertation) wählte. Zunächst sollte ich an der Weiterentwicklung numerischer Modelle für die tropischen Zyklone arbeiten. Doch etwa 1965 bekam ich die Aufgabe, einem amerikanischen Wissenschaftler zu helfen, ein numerisches Modell für die Verteilung der Sauerstoff-Allotrope in der Stratosphäre, Mesosphäre und unteren Thermosphäre zu entwickeln. Durch dieses Projekt erwachte mein Interesse an der Photochemie des atmosphärischen Ozons, und ich begann, intensiv die wissenschaftliche Literatur zu studieren. Dadurch lernte ich den Wissensstand in der Stratosphärenchemie in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre kennen – die »Startbedingungen« für meine wissenschaftliche Karriere. Statt des zunächst vorgeschlagenen Themas bevorzugte ich die Forschung in Stratosphärenchemie, was großzügigerweise akzeptiert wurde. Zu dieser Zeit waren die hauptsächlichen Forschungsgebiete am MISU Dynamik, Wolkenphysik, der Kohlenstoffkreislauf, Studien über die chemische Zusammensetzung von Regenwasser und vor allem das Problem des sauren Regens, auf das in erster Linie die Arbeiten von Svante Odén und Erik Eriksson aufmerksam gemacht hatten. Einige Forscher am MISU befaßten sich intensiv mit diesem Thema, unter ihnen Prof. Bolin und mein guter Freund und Kommilitone Henning Rodhe, der jetzt Professor für Chemische Meteorologie am MISU ist. 1972, auf der ersten Umweltkonferenz der Vereinten Nationen in Stockholm, wurde diesem Thema erhebliches politisches Interesse zuteil [1]. Ich wollte jedoch lieber reine Wissenschaft von natürlichen Prozessen betreiben, daher wählte ich stratosphärisches Ozon als Fachgebiet, ohne im geringsten zu ahnen, was vor mir lag. In der Wahl meines Themas hatte ich absolute Freiheit. Ich kann nicht genug betonen, wie sehr ich die Großzügigkeit und das Vertrauen schätze, das mir von meinen Betreuern entgegengebracht wurde, Prof. Georg Witt, einem Experten der Physik und Chemie der oberen Atmosphäre, und Prof. Bert Bolin, dem Leiter des MISU. Sie haben mir immer viel geholfen und hatten großes Interesse am Fortschritt meiner Arbeit.

Die Ozonchemie in der Stratosphäre

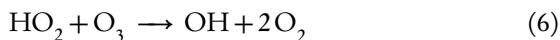
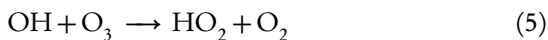
Schon im Jahr 1930 schlug der berühmte britische Wissenschaftler Sydney Chapman [2] die Bildung von »odd oxygen« (ungeradzahligem Sauerstoff) O_x ($= O, O_3$) durch Photolyse von O_2 mit Sonnenstrahlung bei Wellenlängen unter 240 nm vor [Gl. (1)]. Die schnellen Reaktionen (2), M = Mediator, und (3)



sollten danach rasch zu einem stationären Zustand bezüglich der Konzentrationen von O und O_3 führen, ohne die Gesamtkonzentration an ungeradzahligem Sauerstoff zu beeinflussen. Für den Abbau von ungeradzahligem Sauerstoff, der der Bildung durch Reaktion (1) entgegenwirkt, sollte Reaktion (4) sorgen.



Bis in die Mitte der sechziger Jahre wurde allgemein angenommen, daß die Reaktionen (1)–(4) ausreichten, um die vertikale Verteilung der Ozonkonzentration in der Stratosphäre zu erklären. Doch dann wurde vor allem durch eine Studie von Benson und Axworthy [3] deutlich, daß Reaktion (4) viel zu langsam ist, um die Bildung von ungeradzahligem Sauerstoff durch Reaktion (1) auszugleichen (Abb. 1). David Bates und Marcel Nicolet [4], die zusammen mit Sydney Chapman die großen Pioniere auf dem Gebiet der Photochemie der oberen Atmosphäre waren, schlugen 1950 vor, daß Reaktionen mit OH - und HO_2 -Radikalen der Produktion von ungeradzahligem Sauerstoff in der Mesosphäre und Thermosphäre entgegenwirken könnten. Aufbauend auf dieser Arbeit und auf Labormessungen, geleitet von Prof. R. Norrish, einem der Chemienobelpreisträger des Jahres 1967, und seinen Mitarbeitern [5, 6], wurden die Ozonabbaureaktionen (5) und (6) mit OH - bzw.



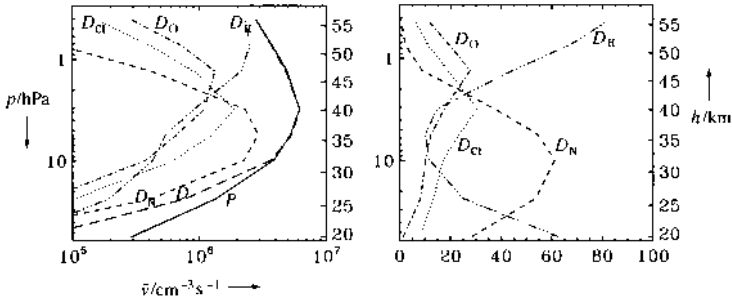
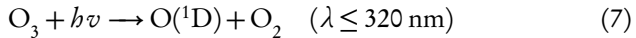


Abbildung 1: Einflüsse der Ozonebildungs- und -abbaureaktionen in Abhängigkeit von der Höhe: D_O = Chapman-Reaktion (4), D_N = NO_x -Katalyse [Gl. (11) und (12)], D_H = HO_x -Katalyse [Gl. (5) und (6)], D_{Cl} = ClO_x -Katalyse [Gl. (21) und (22)] [120]. In den Rechnungen ist die heterogene Aktivierung durch Halogenverbindungen vernachlässigt, die unterhalb 25 km Höhe bei tiefen Temperaturen sehr wichtig wird. \bar{v} = mittlere Reaktionsgeschwindigkeit. Die Zahlen an der Abszisse des rechten Diagramms geben die Anteile der Einzelreaktionen am gesamten Ozonabbau in Prozent wieder. P = Ozonbildung, D = gesamter Ozonabbau.

HO_2 -Radikalen als Katalysatoren von Hampson vorgeschlagen [7] und von Hunt [8] in ein Atmosphärenchemiemodell eingebaut.

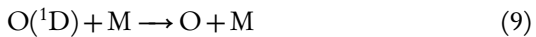
Als Hauptquelle für die OH -Radikale wurde die Photolyse von O_3 durch ultraviolette Sonnenstrahlung mit Wellenlängen unterhalb etwa 320 nm vorgeschlagen [Gl. (7)], die zu $\text{O}(^1\text{D})$,



elektronisch angeregten Sauerstoffatomen, führt, von denen wiederum ein kleiner Teil mit Wasserdampf reagiert [Gl. (8)].



Das meiste $\text{O}(^1\text{D})$ reagiert aber mit O_2 und N_2 [Gl. (9)] und bildet schnell O_3 zurück [Gl. (2)], was einen Nullcyclus ohne Einfluß auf den Gehalt an ungeradzahligem Sauerstoff zur



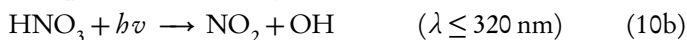
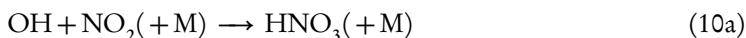
Folge hat. Ohne Labordaten zu den Geschwindigkeitskonstanten der Reaktionen (5) und (6) schätzte Hunt diese zu $k_5 = 5 \times 10^{-13}$ bzw. $k_6 = 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ab, damit die beiden Reaktionen die Produktion von ungeradzahligem Sauerstoff durch Reaktion (1) ausgleichen können.

In meiner »philosophie licentiat thesis« im Jahr 1968 analysierte ich den Vorschlag von Hampson und Hunt und kam zu dem Schluß, daß ihre Geschwindigkeitskonstanten für die Reaktionen (5) und (6) nicht die vertikale Ozonverteilung oberhalb 25 km Höhe in der Stratosphäre mit vorwiegend photochemischen Prozessen erklären konnten. Außerdem zeigte ich [9], daß diese Wahl der Geschwindigkeitskonstanten zu einem unrealistisch hohen Verlust an Ozon in der Troposphäre führen würde (innerhalb von nur einigen Tagen). In einer Vorahnung der möglichen Rolle von OH in der Troposphärenchemie erwähnte ich in derselben Studie kurz die eventuelle Bedeutung der Reaktion von OH mit CH_4 . Heute weiß man, daß die Reaktionen (5) und (6) etwa 25- bzw. 10mal langsamer ablaufen als von Hunt und Hampson vorgeschlagen und daß der CH_4 -Oxidationscyclus eine große Rolle in der Troposphärenchemie spielt, worauf ich später noch zurückkommen werde.

Bezüglich des stratosphärischen Ozons widerlegte ich die Theorie von Hampson und Hunt und schloß, daß zumindest ein Teil der Lösung des Problems der Ozonverteilung die Einführung anderer photochemischer Prozesse ist und daß der Einfluß von Stickstoffverbindungen auf die Photochemie der Ozonschicht untersucht werden mußte.

Leider gab es zu jener Zeit keine Messungen des Gehalts an NO_x (NO und NO_2) in der Stratosphäre, um meine Theorie über deren mögliche Rolle in der Stratosphärenchemie zu untermauern. Im Sommer 1969 wechselte ich für zwei Jahre als Postdoc-Stipendiat der European Space Research Organization an das Department of Atmospheric Physics am Clarendon Laboratory der Oxford University. Als Dr. (heute: Sir) John Houghton, der Leiter der Forschungsgruppe, von meiner Idee einer möglichen Rolle von NO_x hörte, gab er mir ein Sonnenspektrum, das auf einem Ballonflug von Dr. David Murcray und Mitarbeitern gemessen worden war, und meinte, daß es Aufschluß über das Vorhandensein von HNO_3 geben könnte [10]. Nach einigen Analysen konnte ich die ungefähren Mengen an stratosphärischer HNO_3 sowie grob die vertikale Verteilung ableiten. Ich kam nicht dazu, diese Ergebnisse zu veröffentlichen, denn etwa zur gleichen Zeit publizierten Rhine et al. [11] eine Studie, in der sie die vertikale HNO_3 -Säule oberhalb 18.8 km mit 2.8×10^{-4} atm cm ($\approx 7.6 \times 10^{15}$ Moleküle pro cm^2) angaben. Mit dieser Information wußte ich, daß NO_x in der Stratosphäre vorkommen sollte, gebildet durch die Reaktionen (10a) und (10b). Das gab mir genug Mut, meine Studie über den NO_x -katalysierten Ozon-

abbau einzureichen, welcher auf der einfachen Reaktionskette (11), (12) basiert [12].



Die Summenreaktion aus (11) und (12) ist äquivalent zur direkten Reaktion (4). Allerdings kann die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion durch relativ kleine Mengen NO_x in der Größenordnung von einigen nanomol pro mol stark erhöht werden. Außerdem stellte ich eine Berechnung der vertikalen Verteilung stratosphärischer HNO_3 vor. Was die Quelle für NO_x anging, folgte ich zunächst dem Vorschlag von Bates und Hays [13], die annahmen, daß etwa 20% der N_2O -Photolyse N und NO ergäbe. Spätere Studien zeigten jedoch, daß diese Reaktionen nicht stattfinden. Es wurde aber bald danach dargelegt, daß NO auch durch die Oxidation von Lachgas (N_2O) mit $\text{O}(^1\text{D})$ in kleineren, aber immer noch signifikanten Mengen gebildet wird [Gl. (13)] [14-16]. Außerdem zeigten Davis et al. [17],



daß Reaktion (12) etwa 3.5mal schneller abläuft, als ich ursprünglich aus den früheren Labormessungen abgeschätzt hatte. Ein paar Jahre später wurde darüber hinaus gezeigt, daß die früheren Abschätzungen der Ozonproduktion durch die Reaktionen (1) und (2) zu hoch lagen, da sie auf einer Überschätzung sowohl des Absorptionsquerschnittes von molekularem Sauerstoff [18] als auch der Intensität der Sonnenstrahlung im ozonproduzierenden Wellenlängenbereich von 200-240 nm [19, 20] basierten. Als Ergebnis dieser Entwicklungen wurde klar, daß durch Reaktion (13) genug NO produziert wird, um die Reaktionen (11) und (12) zu den wichtigsten Ozonabbaureaktionen im Höhenbereich zwischen etwa 25 und 45 km zu machen.

N_2O ist ein natürliches Produkt mikrobiologischer Prozesse in Böden und im Wasser. Auch zahlreiche anthropogene Aktivitäten, z. B. die Verwendung von Stickstoffdüngern in der Landwirtschaft, führen zu signifikanten N_2O -Emissionen. In den letzten Jahrzehnten stieg die

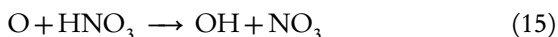
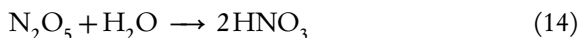
atmosphärische N_2O -Konzentration um etwa 0.3% pro Jahr [21]. Das war 1971 jedoch noch nicht bekannt. Die Entdeckung, daß ein primär biosphärisches Produkt einen indirekten Einfluß auf die Chemie der Ozonschicht ausübt, belebte deutlich die wissenschaftliche Zusammenarbeit von Biologen und Atmosphärenforschern.

Der Einfluß des Menschen auf das stratosphärische Ozon

Im Herbst 1970 bekam ich, immer noch in Oxford, den Vorabdruck einer vom Massachusetts Institute of Technology geförderten Studie über kritische Umweltprobleme (SCEP), die im Juli desselben Jahres durchgeführt worden war [22]. Dieser Bericht zog auch den möglichen Einfluß der Einführung einer großen Flotte stratosphärischer Überschallflugzeuge in Betracht (USA: Boeing; England/Frankreich: Concorde, Sowjetunion: Tupolev) und gab mir die erste quantitative Abschätzung des NO_x -Eintrags in die Stratosphäre, der von einer solchen Flotte herrühren würde. Als ich dies mit der NO_x -Produktion durch Reaktion (13) verglich, wurde mir sofort klar, daß wir einem ersten globalen Umweltproblem entgegengehen könnten. Meine Studie, in der ich die wichtige katalytische Rolle von NO_x bei der Ozonzerstörung darstellte und die schon im April 1970 veröffentlicht worden war, hatten die SCEP-Autoren offensichtlich nicht bemerkt, da sie folgerten, »The direct role of CO , CO_2 , NO , NO_2 , SO_2 , and hydrocarbons in altering the heat budget is small. It is also unlikely that their involvement in ozone photochemistry is as significant as water vapour.« Diese Aussage erregte mich so stark, daß ich irgendwo an den Rand des Textes »Idioten« schrieb.

Nachdem mir klar geworden war, daß ich auf ein sehr heißes Thema gestoßen war, erweiterte ich meine Studien und behandelte die Chemie der Stickstoffoxide (NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_4 , N_2O_5), der OH - und HO_2 -Radikale und von HNO_3 detaillierter, zum Teil aufbauend auf dem Übersichtsartikel von Nicolet [23]. Dabei traten rasch Schwierigkeiten auf. Zunächst berechnete ich mit dem Reaktionsschema von Nicolet hohe Konzentrationen an N_2O_4 , ein Problem, das ich schnell lösen konnte, als mir klar wurde, daß diese Verbindung thermisch instabil ist, was von Nicolet nicht berücksichtigt worden war. Mehr Kopfzerbre-

chen bereiteten mir die Reaktionen (14) und (15), für die die einzigen damals verfügbaren Labordaten sehr



hohe Geschwindigkeitskonstanten bei Raumtemperatur lieferten: $k_{14} = 1.7 \times 10^{-18}$ und $k_{15} = 1.7 \times 10^{-11} - 17 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Eine Kombination der Reaktionen (14) und (15) mit diesen Geschwindigkeitskonstanten ergäbe eine starke Quelle von OH-Radikalen, etwa 1000mal stärker als Reaktion (8), was zu einem viel zu schnellen Ozonabbau führen würde. Dies war eine sehr nervenaufreibende Zeit für mich. Damals gab es noch keine kritischen Übersichten über und Empfehlungen für Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten. Da mir eine formale chemische Ausbildung fehlte, mußte ich mir einen Großteil der benötigten Chemie aus den vorhandenen Veröffentlichungen aneignen, wenn ich auch sehr von Diskussionen mit Kollegen an der Universität profitierte, besonders von denen mit Dr. Richard Wayne am Physical Chemistry Laboratory, einem ehemaligen Studenten von Prof. R. Norrish in Cambridge. Ich führte aufwendige Modellrechnungen zur vertikalen Verteilung der Spurengase des O_x – NO_x – HO_x – HNO_x -Systems durch und diskutierte alle Schwierigkeiten in einer Veröffentlichung, die Ende 1970 beim *Journal of Geophysical Research* eingereicht wurde, dort am 13. Januar 1971 einging und nach der Revision schließlich in der Ausgabe vom 20. Oktober 1971 erschien [15]. Die starke Verzögerung der Veröffentlichung kam durch einen langen Streik der britischen Post zustande. Wegen der angesprochenen größeren Probleme führte ich keine Berechnungen zur Ozonabnahme durch, sondern wies nur auf die mögliche Bedeutung dieses Problems mit folgenden Worten hin:

»An artificial increase of the mixing ratio of the oxides of nitrogen in the stratosphere by about 1×10^{-8} may lead to observable changes in the atmospheric ozone level ... It is estimated that global nitrogen oxide mixing ratios may increase by almost 10^{-8} from a fleet of 500 SSTs in the stratosphere. Larger increases, up to 7×10^{-8} , are possible in regions of high traffic densities ... Clearly, serious decreases in the total atmospheric ozone level and changes in the vertical distributions of ozone, at least in certain regions, can result from such an activity ... «

Die Kontroverse um Überschallflugzeuge in den USA

Mir war nicht bekannt, daß in den Vereinigten Staaten ein Meinungsstreit über den potentiellen Umwelteinfluß von stratosphärischen Überschallflugzeugen (supersonic stratospheric transport, SST) ausgebrochen war. Zunächst war man hauptsächlich besorgt über eine erhöhte Ozonzerstörung durch OH- und HO₂-Radikale, die vom Wasser aus den Triebwerksabgasen herrühren [24]. Mitte März 1971 wurde eine Tagung in Boulder (Colorado) von einem Beratungsausschuß des US-Wirtschaftsministeriums organisiert, zu der Prof. Harold Johnston von der University of California in Berkeley eingeladen wurde. Als Experte für experimentelle Kinetik und für die Reaktionsmechanismen von NO_x-Verbindungen [25-27] wurde ihm sofort klar, daß der Einfluß von NO_x auf den Ozonabbau in der Stratosphäre weit unterschätzt worden war. Sehr kurz danach erschien am 6. August 1971 seine Veröffentlichung in *Science* (eingereicht am 14. April, revidiert am 14. Juni) mit dem Titel »Reduction of Stratospheric Ozone by Nitrogen Oxide Catalysts from Supersonic Transport Exhaust«. In der Zusammenfassung schrieb er:

»... oxides of nitrogen from SST exhaust pose a much greater threat to the ozone layer than does the increase in water. The projected increase in stratospheric oxides of nitrogen could reduce the ozone shield by about a factor of 2, thus permitting the harsh radiation below 300 nanometers to permeate the lower atmosphere.«

Im Sommer 1971 bekam ich von einem Mitarbeiter von British Aerospace, einem der Hersteller der Concorde, einen Vorabdruck der Studie von Johnston. Es war das erste Mal, daß ich von Harold Johnston hörte, für den ich schnell einen großen Respekt sowohl als Wissenschaftler als auch als Mensch entwickelte. Obwohl ich mich aus den zuvor genannten Gründen eher vorsichtig zum möglichen Einfluß stratosphärischer NO_x-Emissionen von SSTs geäußert hatte, stimmte ich Prof. Johnston bezüglich der möglichen ernstesten Konsequenzen für das stratosphärische Ozon vollkommen zu. Ich war sehr froh, von so einem hervorragenden Wissenschaftler Unterstützung für meine Ideen zu erhalten. Für einen ausführlichen Rückblick auf die Kontroverse zwischen Wissenschaftlern und der Industrie sowie zwischen Meteorologen und Chemikern, die auch in späteren Jahren immer wieder aufflammte, verweise

ich auf Johnstons Artikel »Atmospheric Ozone« [28]. Im übrigen lösten die Veröffentlichungen von Johnston Anfang der siebziger Jahre viele der größeren reaktionskinetischen Probleme, auf die ich in meiner Studie 1971 gestoßen war [15]. Zum Beispiel wurde gezeigt, daß weder Reaktion (14) noch (15) in signifikantem Umfang in der Gasphase abläuft und daß die früheren experimentellen Studien stark von Reaktionen an den Wänden der Reaktionsgefäße verfälscht worden waren [29], ein Hinweis, den mir Prof. Sydney Benson von der University of Southern California schon früher in einem persönlichen Gespräch gegeben hatte.

Im Juli 1971 kehrte ich an die Universität Stockholm zurück und widmete mich hauptsächlich dem Einfluß von NO_x -Einträgen der SSTs auf das stratosphärische Ozon. Im Mai 1973 reichte ich meine Dissertation mit dem Thema »Über die Photochemie von Ozon in der Stratosphäre und Troposphäre und die Verschmutzung der Stratosphäre durch hochfliegende Flugzeuge« bei der Fakultät der Naturwissenschaften ein und erhielt den »Doktor of Philosophy« mit der bestmöglichen Note, die damit erst zum dritten Mal überhaupt in der Geschichte der Stockholmer Universität (und der früheren Stockholmer Högskola) vergeben wurde. Das war eines der letzten Male, daß der klassische und recht würdevolle »Filosofie Doktor«, ähnlich der Habilitation in Deutschland oder Frankreich, verliehen wurde. Ich mußte mich wie zu den Nobel-Feierlichkeiten kleiden. Meine ersten beiden »Gegenspieler« waren Dr. John Houghton und Dr. Richard Wayne von der University of Oxford, die zu diesem Ereignis ihre College-Roben trugen. Dr. Wayne fungierte darüber hinaus auch sehr fähig als nicht obligatorischer dritter Gegenspieler, dessen Aufgabe es war, den Kandidaten aufs Glatteis zu führen. Leider wurde dieser klassische Doktorgrad abgeschafft. Der moderne schwedische »Filosofie Doktor« entspricht eher dem früheren Philosophie-Licentiat-Grad.

Es wurden große Forschungsprogramme begonnen, hauptsächlich als Ergebnis der Annahme von Johnston [27], daß die NO_x -Emissionen von SSTs ernsthaft die Ozonschicht gefährden könnten: das Climate Impact Assessment Program, das vom US-Verkehrsministerium organisiert wurde [30], und das Programm COVOS/COMESA [31, 32], das von Frankreich und Großbritannien (den Herstellern der Concorde) gemeinsam gefördert wurde. Das Ziel dieser Programme war die Untersuchung der chemischen und meteorologischen Prozesse in der

Stratosphäre, von denen zu dieser Zeit noch so wenig bekannt war, daß die Stratosphäre manchmal auch »Ignorosphäre« titulierte wurde.

Das Ergebnis der CIAP-Studie wurde 1975 in einer Veröffentlichung der US National Academy of Science zusammengefaßt [33]:

»We recommend that national and international regulatory authorities be alerted to the existence of potentially serious problems arising from growth of future fleets of stratospheric airlines, both subsonic and supersonic. The most clearly established problem is a potential reduction of ozone in the stratosphere, leading to an increase in biologically harmful ultraviolet light at ground level.«

Die geplanten großen Flotten von SSTs wurden nie gebaut, jedoch hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen; zur Zeit fliegen nur ein paar Concorde. Doch das Wissen über die Chemie in der Stratosphäre hatte durch die Forschungsprogramme CIAP und COVOS/COMESA stark zugenommen. Die katalytische Rolle von NO_x in der Ozonchemie der Stratosphäre wurde dabei bestätigt. Ein überzeugendes Beispiel dafür wurde durch ein großes Sonnenprotonen-Ereignis im August 1972 geliefert, während dessen innerhalb weniger Stunden große Mengen NO , vergleichbar mit dem normalen NO_x -Gehalt in hohen geomagnetischen Breiten ($> 65^\circ$), gebildet wurden (Abb. 2). Dieser große NO -Eintrag sollte zu einem stärkeren Abbau von stratosphärischem Ozon führen [34], eine Hypothese, die durch die Analyse von Satellitendaten bestätigt werden konnte [35]. Die berechneten und beobachteten Ozonabnahmen sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Rechnungen wurden mit einem Modell durchgeführt, das auch Chlorchemie berücksichtigt [36].

Ich hatte meine wissenschaftliche Karriere mit der Absicht begonnen, Grundlagenforschung zu natürlichen Prozessen zu betreiben, doch die Erfahrungen in den frühen siebziger Jahren machten äußerst deutlich, daß menschliche Aktivitäten so stark zugenommen hatten, daß sie mit natürlichen Prozessen konkurrieren und diese sogar stören konnten. Seitdem war dies ein bedeutender Faktor in meinen wissenschaftlichen Bemühungen. Schon Ende 1971 schrieb ich in einem Artikel für das sowjetische »The Future of Science Year Book«:

»... the upper atmosphere is an important part of our environment. Let us finish by expressing a sincere hope that in the future environmental dangers of new technological development will be

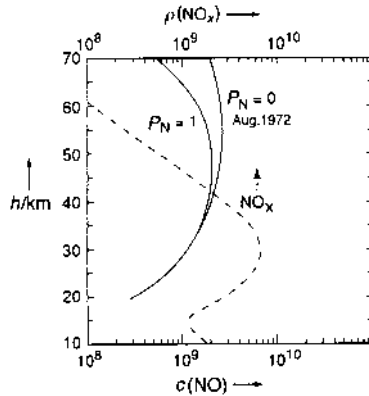


Abbildung 2: NO-Produktion (c in Molekülen pro cm^3 ; durchgezogene Linien) in hohen geomagnetischen Breiten während des Sonnenprotonen-Ereignisses im Jahr 1972 mit zwei verschiedenen Annahmen über den elektronischen Zustand der gebildeten N-Atome ($P_N = 0$ oder 1). Weiterhin sind die mittleren NO_x -Konzentrationen für diese Orte dargestellt.

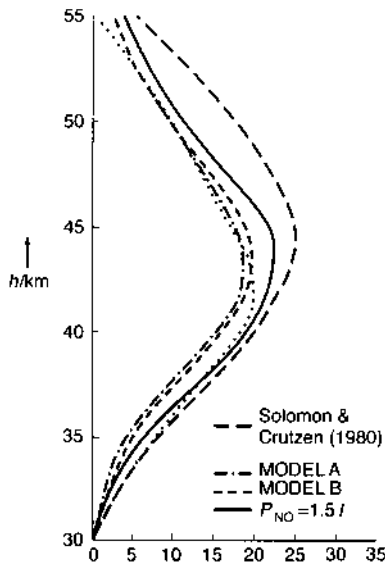


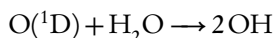
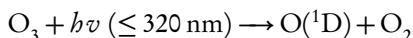
Abbildung 3: Beobachteter und berechneter Anteil der vom Sonnenprotonen-Ereignis 1972 verursachten Ozonzerstörung acht Tage nach dem Ereignis. Die verschiedenen berechneten Kurven korrespondieren zu nicht gut bekannten Parameterwerten, die deshalb unterschiedlich angesetzt wurden.

recognizable at an early stage. The proposed supersonic air transport is an example of a potential threat to the environment by future human activities. Other serious problems will certainly arise in the increasingly complicated world of tomorrow.«

Das troposphärische Ozon

Meine ersten Gedanken über die Photochemie der Troposphäre gehen, wie bereits kurz erwähnt, etwa in das Jahr 1968 zurück [9]. Dennoch konzentrierte ich meine Forschung in den folgenden drei Jahren stark auf die Ozonchemie der Stratosphäre. Dann veröffentlichte Hiram Levy III (damals am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, MA) 1971 eine sehr wichtige Studie [37]. In ihr schlug er vor, daß OH-Radikale auch in der Troposphäre durch die Wirkung von Sonnenlicht auf Ozon gebildet werden [Gl. (7) und (8)] und daß sie für die Oxidation von CH_4 und CO verantwortlich sind. Diese Idee wurde schnell von Jack McConnell, Michael McElroy und Steve Wofsy von der Harvard University aufgegriffen [38]. Das Erkennen der wichtigen Rolle von OH war ein großer Schritt hin zu einem Verständnis der Atmosphärenchemie. Trotz seiner geringen Konzentration, die momentan mit ungefähr 10^6 Molekülen pro cm^3 , entsprechend einem mittleren troposphärischen Mischungsverhältnis von $1 : 4 \times 10^{-14}$, angegeben wird [39], ist es dieser Minimalbestandteil – und nicht der 10^{13} mal häufigere molekulare Sauerstoff –, der für die Oxidation fast aller Verbindungen verantwortlich ist, die durch natürliche Prozesse und anthropogene Aktivitäten in die Atmosphäre gelangen. Die Lebensdauer der meisten atmosphärischen Spurengase ist darum hauptsächlich durch die OH-Konzentration und die Geschwindigkeit der entsprechenden Oxidation bestimmt [40] (Tabelle 1). Die Spurengase, die nicht mit OH reagieren, haben daher lange Lebensdauern in der Atmosphäre und werden vor allem in der Stratosphäre abgebaut. Beispiele für die zweite Gruppe von Verbindungen sind N_2O und einige vollständig halogenierte organische Verbindungen wie CFCl_3 , CF_2Cl_2 und CCl_4 . Diese spielen eine wichtige Rolle in der Ozonchemie der Stratosphäre, worauf ich später zurückkommen werde.

primäre Produktion der OH-Radikale:



globale 24-Stunden-Mittelwerte:

$$c(\text{OH}) \approx 10^6 \text{ Moleküle pro cm}^3$$

molares Mischungsverhältnis in der Troposphäre ca. $1 : 4 \times 10^{-14}$

Die Reaktion mit OH bestimmt für die meisten Gase ihre Lebensdauer in der Atmosphäre:

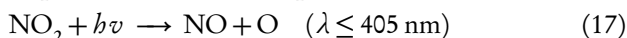
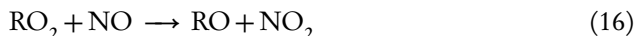
CH_4 :	8 Jahre	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$:	2-3 Tage
C_2H_6 :	2 Monate	CH_3Cl :	ca. 1 Jahr
C_3H_8 :	10 Tage	CH_3CCl_3 :	5 Jahre
C_5H_8 :	ein paar Stunden	NO_2 :	ca. 1 Tag

CFCl_3 , CF_2Cl_2 und N_2O reagieren nicht mit OH. Sie werden in der Stratosphäre abgebaut und haben einen großen Einfluß auf die Ozonchemie.

Tabelle 1: Die Bedeutung des OH-Radikals für die Atmosphärenchemie.

Nach Levys Veröffentlichung wandte ich meine Aufmerksamkeit der Troposphärenchemie zu. Zum ersten Mal bei einem Vortrag auf dem internationalen Ozonsymposium 1972 in Davos (Schweiz) schlug ich vor, daß lokale, innertroposphärische chemische Prozesse Ozon in größeren Mengen produzieren oder abbauen können, als durch den Abwärtsfluß aus der Stratosphäre in die Troposphäre bewirkt wird [41, 42]. Der Ozonabbau resultiert aus den Reaktionen (5)-(8). Die Ozonbildung findet in Umgebungen mit genügend NO_x gemäß (16), (17) und (2) statt, wobei $\text{R} = \text{H}$, CH_3 , andere organische Radikale ist.

- 3 Anmerkung der Redaktion: Zu Stickstoffverbindungen in der Troposphäre siehe beispielsweise [121].



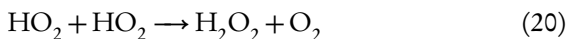
NO ist daher in doppelter Hinsicht als Katalysator in der Atmosphärenchemie wichtig: In Höhen oberhalb 25 km, in denen die Konzentration an atomarem Sauerstoff hoch ist, dominiert der Ozonabbau durch die Reaktionen (11) und (12) über die Ozonbildung durch die Reaktionen (16), (17) und (2). Die letztere Reaktionskette ist die Grundlage der gesamten photochemischen Ozonbildung in der Troposphäre, einschließlich der Reaktionen, die während photochemischer Smog-Episoden stattfinden, was zuerst in Südkalifornien entdeckt und von Johnston diskutiert wurde [28]. Diese Reaktionen können aber auch in Reinluftgebieten stattfinden. Im Falle der CO-Oxidation laufen die Reaktionen (16)–(19) und (2) ab. Diese Reaktionskette erfordert ausreichende NO-Konzentrationen.



Für niedrige NO-Mischungsverhältnisse unterhalb etwa 10 pmol pro mol führt die CO-Oxidation zur Ozonzerstörung, da dann das HO_2 -Radikal hauptsächlich mit O_3 reagiert [siehe Gl. (6)]. Das Resultat der beteiligten Reaktionen [(18) + (19) + (6)] ist: $\text{CO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_2$.

In ähnlicher Weise führt die Oxidation von CH_4 in Gegenwart von ausreichend NO_x zur Bildung von Ozon in der Troposphäre.

Außer mit NO und O_3 kann HO_2 auch mit sich selbst reagieren [Gl. (20)]. Hierbei wird H_2O_2 gebildet, ein starkes Oxidationsmittel für S^{IV} -Verbindungen in Wolken und Regenwasser.



	global	NH	SH
<i>Quellen</i>			
$\text{HO}_2 + \text{NO}$	6.5	4.1	2.4
$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{NO}$	1.7	1.0	0.7
Transport aus der Stratosphäre	1.0	0.7	0.3
<i>Senken</i>			
$\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O}$	3.8	2.2	1.6
$\text{HO}_2 + \text{O}_3$ und $\text{OH} + \text{O}_3$	2.8	1.8	1.0
Ablagerung auf der Oberfläche	2.7	1.8	0.9
Differenz der beiden chemischen Quellen und Senken	1.6	1.1	0.5

Tabelle 2: Ozonhaushalt der Troposphäre, global, für die Nordhemisphäre (NH) und für die Südhemisphäre (SH) in 10^{13} mol pro Jahr. Nur die CH_4 - und CO -Oxidationscyclen sind hier berücksichtigt. Die Rechnungen wurden mit der aktuellen Version des globalen, dreidimensionalen Modells MOGUNTIA durchgeführt [48].

Mein Vortrag beim internationalen Ozonsymposium wurde von einigen Wissenschaftlern nicht gut aufgenommen. Doch in den folgenden Jahren fand die Idee immer mehr Unterstützung. So waren es Bill Chameides und Jim Walker [43], damals an der Yale University, die diese Idee aufnahmen und soweit gingen vorzuschlagen, daß sogar die tägliche Variation des Ozongehalts der unteren Troposphäre vorwiegend durch photochemische troposphärische Prozesse erklärt werden kann. Obwohl ich dieser Hypothese nicht zustimmte (denn die CH_4 - und CO -Oxidationen waren einfach nicht schnell genug dafür), war es gut zu sehen, daß meine Ideen ernst genommen wurden. (Ich muß natürlich sofort ergänzen, daß vor allem Bill Chameides in späteren Jahren viel zu unserem Wissen über troposphärisches Ozon beigetragen hat.) Ein paar Jahre später erbrachte ich zusammen mit zwei meiner besten Studenten, Jack Fishman und Susan Solomon, den deutlichen Nachweis für eine starke troposphärische Ozonchemie [44, 45]. Labormessungen von Howard und Evenson [46] zeigten dann, daß Reaktion (16) etwa 40mal schneller war als vorher abgeschätzt, was zu starker Ozonproduktion und höheren OH-Konzentrationen mit wichtigen Konsequenzen für

die Chemie von Troposphäre und Stratosphäre führt [47]. Eine Konsequenz dieser schnelleren Reaktion ist, daß der geschätzte Ozonabbau durch stratosphärische Flugzeuge abnimmt, da die Ozonbildungsreaktionen (16') + (17) + (2) über die Abbaureaktion (6) dominieren. Darüber hinaus hat eine schnellere Reaktion (16') höhere OH-Konzentrationen zur Folge, was wiederum zu einer rascheren Umwandlung reaktiver NO_x -Verbindungen in weit weniger reaktive HNO_3 führt. In Tabelle 2 sind neuere Rechnungen zum Ozonhaushalt der Troposphäre mit einem dreidimensionalen Transportmodell angegeben. Die Ergebnisse belegen eindeutig die Dominanz der innertroposphärischen Ozonbildungs- und -abbaureaktionen. Mit demselben Modell wurden auch die heutigen und die vorindustriellen Ozonverteilungen berechnet (Abb. 4). Es ergab sich ein deutlicher Anstieg an troposphärischem Ozon über die letzten Jahrhunderte [48]. In Abbildung 5 sind auch die meridionalen Querschnitte von zonal gemittelten Ozonkonzentrationen gezeigt, die von Jack Fishman ermittelt wurden (unveröffentlichte Ergebnisse).

Mit dem gleichen Modell berechneten wir außerdem die Verteilung der OH-Konzentrationen für vorindustrielle und gegenwärtige Bedingungen. Seit vorindustriellen Zeiten sind die CH_4 -Volumenmischungsverhältnisse von etwa 0.7 auf 1.7 ppmv (v kennzeichnet, daß Volumina verglichen werden) gestiegen [49]. Da die Reaktion mit CH_4 eine der Hauptsinken für OH ist, sollte ein Anstieg der CH_4 -Konzentration zu einem Absinken der OH-Konzentration führen. Zugleich jedoch sollten erhöhte Ozonkonzentrationen eine Zunahme der OH-Produktion durch die Reaktionen (7) und (8) bewirken. Der gleiche Effekt ist von den Reaktionen (6) und (16') zu erwarten, die von der starken anthropogenen NO-Produktion angeregt werden. Abbildung 6 zeigt die zonal gemittelten, meridionalen Verteilungen über den Tag gemittelter OH-Konzentrationen, sowohl für die vorindustrielle als auch für die industrielle Zeit. Man erkennt folgendes:

- a) Starke Maxima der OH-Konzentrationen in den Tropen, hauptsächlich verursacht durch intensive ultraviolette Strahlung als Folge einer minimalen vertikalen Ozonsäule. Daher ist die Effizienz von Oxidationsprozessen in der Atmosphäre besonders von tropischen Prozessen bestimmt. Beispielsweise wird das meiste CH_4 und CO durch die Reaktion mit OH in den Tropen aus der Atmosphäre entfernt.

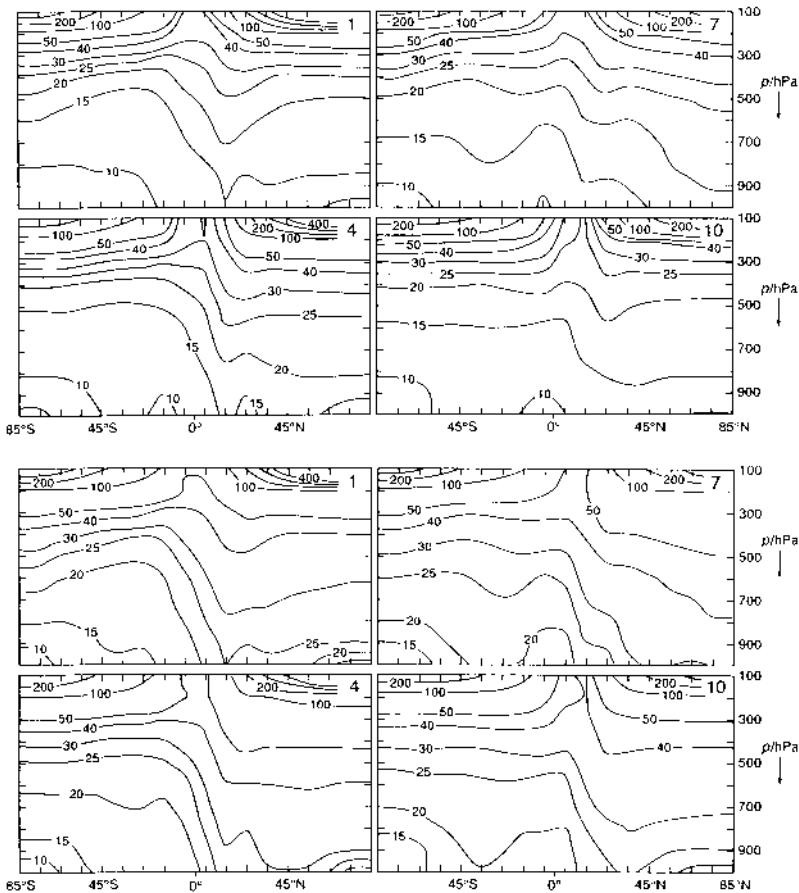


Abbildung 4: Berechnete, zonal gemittelte Ozon-Volumenmischungsverhältnisse in Einheiten von nmol pro mol für die Monate Januar, April, Juli und Oktober in vorindustrieller Zeit (oben) und im Jahr 1985 (unten).

- b) Die Möglichkeit einer signifikanten Abnahme der OH-Konzentrationen von vorindustriellen zu industriellen Bedingungen.

Die Resultate, die in Abbildung 6 unten dargestellt sind, sind von großer Wichtigkeit, da von ihnen Abschätzungen über die Senke für atmosphärisches CH_4 durch die Reaktion mit OH abgeleitet werden können. Vor der Entdeckung der fundamentalen Rolle des OH-Radikals [37] hatten die Abschätzungen der Quellen und Senken atmosphärischer Spurengase meist keine wissenschaftliche Grundlage. Wie man Tabelle 3

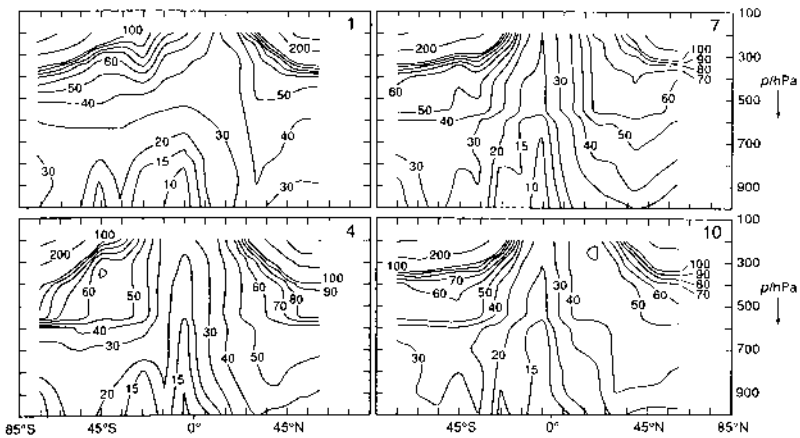


Abbildung 5: Zusammenstellung vor 1989 beobachteter meridionaler Querschnitte der Ozonverteilung in nmol pro mol (durch Jack Fishman vom NASA Langley Research Center) für die Monate Januar, April, Juli und Oktober. Es sollte erwähnt werden, daß die Datenbasis sehr begrenzt ist, was sich für die Tropen und Subtropen in den letzten Jahren nicht geändert hat.

entnehmen kann, hat diese Erkenntnis bei den Abschätzungen des CH_4 - und CO -Haushaltes zu großen Änderungen geführt. »Zuverlässige« Abschätzungen des CH_4 -Haushaltes aus dem Jahr 1968 (hier wird keine Referenz angegeben) ergaben sehr hohe Werte des CH_4 -Eintrages aus natürlichen Feuchtgebieten. Mit einem so dominierenden Anteil natürlicher Quellen wäre der Anstieg der atmosphärischen CH_4 -Konzentrationen von fast 1% pro Jahr nicht zu erklären gewesen. Andererseits waren die früheren Abschätzungen zu den CO -Quellen viel zu niedrig.

Die Dominanz der OH -Konzentrationen und die große photochemische Aktivität in den Tropen weisen deutlich auf die Bedeutung der Tropen und Subtropen für die Atmosphärenchemie hin. Trotz dieser Tatsache wird die Erforschung der Chemie in niedrigen geographischen Breiten stark vernachlässigt, so daß es noch nicht einmal eine zufriedenstellende Statistik der Ozonverteilung für diesen Teil der Welt gibt. Die Chemie der tropischen Atmosphäre ist ein Gebiet, das in meinen Studien stets eine große Rolle gespielt hat und auch in Zukunft spielen wird. Im Gegensatz zur allgemeinen Ansicht der frühen achtziger Jahre wird die chemische Zusammensetzung der tropischen und subtropischen Atmosphäre deutlich von menschlichen Aktivitäten

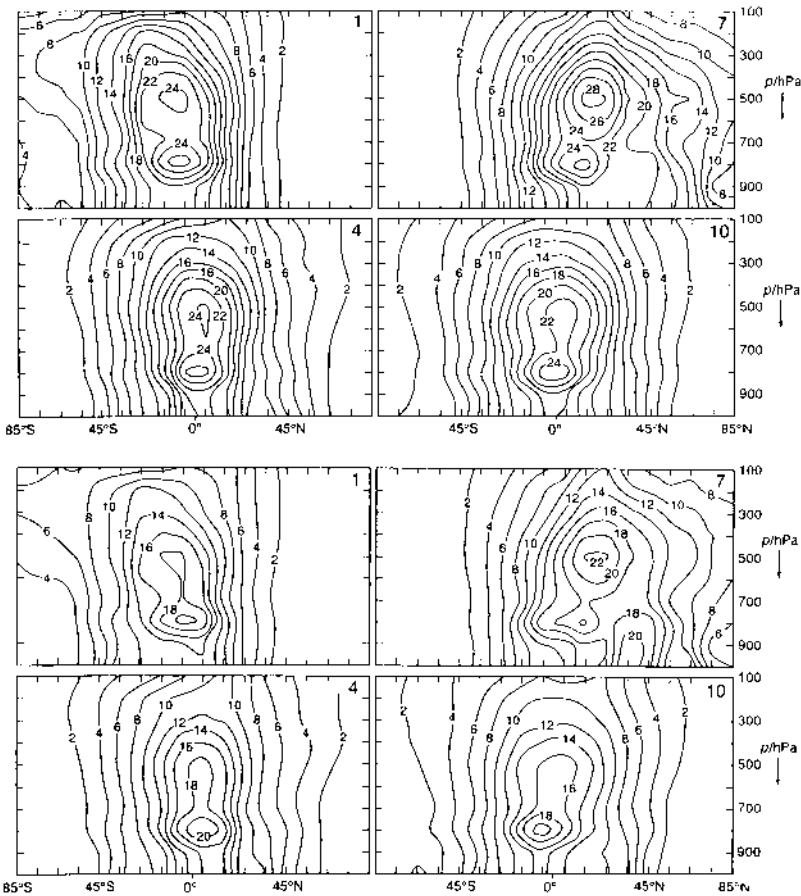


Abbildung 6: Berechnete zonal und über 24 Stunden gemittelte OH-Konzentrationen in Einheiten von 10^5 Molekülen pro cm^3 für die Monate Januar, April, Juli und Oktober in vorindustrieller Zeit (oben) und im Jahr 1985 (unten).

beeinflusst, speziell von der Biomassenverbrennung, die während der Trockenzeiten geschieht. Die große zeitliche und örtliche Variabilität der Ozonkonzentration in den Tropen ist in Abbildung 7 dargestellt. Die höchsten Konzentrationen werden in den verschmutzten Gebieten über dem Festland während der Trockenzeiten beobachtet und die niedrigsten in der Reinflut über dem Pazifik. Ich werde auf das troposphärische Ozon der Tropen später zurückkommen, doch zunächst die

	1968	1995
CH ₄ :		
natürliche Feuchtgebiete	1180	275
anthropogene Quellen	270	265
Summe	1450	540
CO:		
natürliche Quellen	75	860
anthropogene Quellen	274	1640
Summe	350	2500
S:		
Luftverschmutzung	76	78
aus den Ozeanen	30 (H ₂ S)	25 (Me ₂ S)
vom Land	70 (H ₂ S)	etwas (mehrere Verbindungen)
Summe	176	105
NO _x :		
biologische Quellen	150	10
Luftverschmutzung	15	24
Blitze	—	2 — 10
Summe	165	36 — 44
N ₂ O:		
biologische Quellen	340	15
anthropogene Quellen	—	3.5
Summe	340	18.5

Tabelle 3: Abschätzungen der Haushalte wichtiger atmosphärischer Spurengase in den Jahren 1968 und 1995. Die Mengen sind in 10¹² g pro Jahr angegeben (bei den Schwefel- und Stickstoffverbindungen bezogen auf S bzw. N).

stürmischen Entwicklungen bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre durch Halogenverbindungen beschreiben, die 1974 begannen.

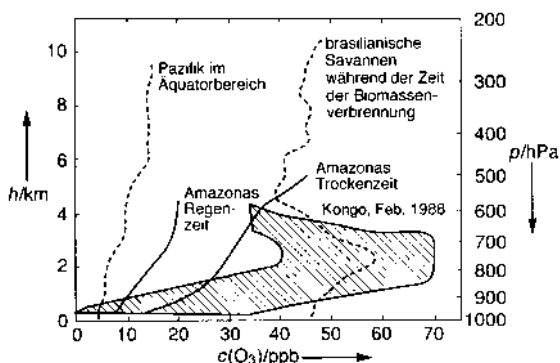
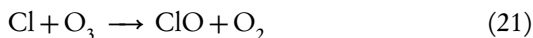


Abbildung 7: Variabilität der Ozonprofile in den Tropen; man sieht den Unterschied zwischen Trocken- und Regenzeit sowie zwischen Kontinent und Meer.

Die Verschmutzung der Stratosphäre durch ClO_x -Verbindungen

Gegen Ende des CIAP-Programms begannen einige Wissenschaftler, sich für den möglichen Einfluß reaktiver Chlorradikale auf das stratosphärische Ozon zu interessieren. In der gründlichsten dieser Studien berechneten Stolarski und Cicerone [50] deutliche Ozonabnahmen, falls anorganische Chlorverbindungen in der Stratosphäre mit einem Mischungsverhältnis von 1 nmol pro mol Luft vorhanden wären. Der Abbau von ungeradzahligem Sauerstoff fände durch den Katalysezyklus (21) + (22) statt. Er hat sehr große Ähnlichkeiten mit dem NO_x -Katalysezyklus (11) + (12).



Die Studie von Stolarski und Cicerone, die erstmals im Herbst 1973 auf einer Konferenz in Kyoto (Japan) vorgestellt wurde, nahm hauptsächlich Vulkanausbrüche als Quellen für ClX -Verbindung an. (Ursprünglich interessierten sich die beiden für die Chlorchemie jedoch wegen des möglichen Einflusses der Abgase aus den Feststoffraketen des Space Shuttle auf die Atmosphäre.) Zwei andere Konferenzbeiträge beschäftigten sich ebenfalls mit der ClO_x -Chemie [51, 52]. Diese drei Studien mühten sich alle mit dem Problem einer fehlenden Chlorquelle in der

Stratosphäre ab (die Forschung der letzten zwanzig Jahre hat gezeigt, daß Vulkane als Quellen eher unbedeutend sind).

Im Herbst 1973 und Anfang 1974 verbrachte ich einige Zeit damit, nach möglichen anthropogenen Quellen für Chlor in der Stratosphäre zu suchen. Zunächst galt meine Aufmerksamkeit dem DDT und anderen Pestiziden. Dann las ich eine Studie von James Lovelock und Mitarbeitern [53], die über dem Atlantik atmosphärisches CFCl_3 (50 pmol pro mol) und CCl_4 (71 pmol pro mol) nachgewiesen hatten. Diese Messungen wurden durch Lovelocks Erfindung, den Elektroneneinfang-Detektor für gaschromatographische Analysen, möglich, der ein großer Fortschritt für die Umweltwissenschaften war. Diese Studie gab mir die ersten Abschätzungen der industriellen Produktion von CF_2Cl_2 und CFCl_3 . Es wurde außerdem darauf hingewiesen, daß diese Verbindungen ungewöhnlich stabil und sehr wenig wasserlöslich seien, daher in der Atmosphäre bleiben und sich dort anreichern sollten, daß aber von der Gegenwart dieser Substanzen in der Atmosphäre keine Gefahr ausgehen dürfte. Diese Aussage hatte mich gerade neugierig auf den Verbleib dieser Verbindungen in der Atmosphäre gemacht, als mir von M. J. Molina und F. S. Rowland ein Vorabdruck ihrer Studie mit dem Titel »Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes – Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone« zugeschickt wurde. Ich wußte sofort, daß dies eine äußerst wichtige Arbeit war, und entschied mich, sie kurz in einem Vortrag zu erwähnen, zu dem ich von der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften in Stockholm eingeladen worden war. Was ich jedoch nicht wußte, war, daß zu diesem Vortrag auch Pressevertreter eingeladen waren. Innerhalb weniger Tage erschien zu meiner großen Überraschung ein Artikel in der schwedischen Zeitung *Svenska Dagbladet*, der auf diesen Punkt aufmerksam machte. Dieser Artikel zog sehr schnell internationale Aufmerksamkeit nach sich, und ich wurde bald danach von Vertretern des deutschen Chemiekonzerns Hoechst und auch von Professor Rowland besucht, der zu dieser Zeit ein Forschungsfreisemester in der Wiener Atomenergiebehörde verbrachte.

Dies war das erste Mal, daß ich von Molina und Rowland hörte, was nicht überraschend war, da sie sich bis dahin nicht mit der Chemie der Atmosphäre befaßt hatten. Es ist klar, daß ich an diesem Thema weiterhin äußerst interessiert war. Etwa zwei Monate nach der Veröffentlichung von Molina und Rowlands Arbeit [54] stellte ich eine Modellstudie über die mögliche Ozonzerstörung durch den dauerhaf-

ten Gebrauch von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs) vor [55] und zeigte, daß ein Ozonverlust bis etwa 40% in 40 km Höhe auftreten könnte, wenn der Verbrauch dieser Verbindungen von 1974 an konstant bliebe. Fast gleichzeitig veröffentlichten Cicerone et al. [56] eine Arbeit, in der sie vorhersagten, daß bis 1985-1990 bei einem gleichbleibenden Verbrauch der FCKWs auf dem Niveau der frühen siebziger Jahre die ClO_x -katalysierte Ozonzerstörung etwa so bedeutend wie der Ozonabbau durch die natürlichen Ozonsenken sein könnte. Die Arbeit von Molina und Rowland führte dazu, daß die Forschung in Stratosphärenchemie intensiviert wurde, nun mit dem Schwerpunkt auf den Chlorverbindungen.

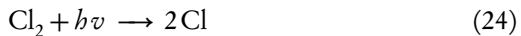
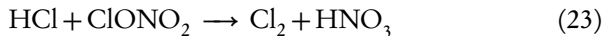
Im Sommer 1974 zog ich mit meiner Familie nach Boulder (Colorado), wo ich zwei halbe Stellen annahm, die eine als Berater des Aeronomy Laboratory der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), die andere beim Upper Atmosphere Project des National Center of Atmospheric Research (NCAR). Die NOAA-Arbeitsgruppe, die unter der fähigen Leitung von Dr. Eldon Ferguson zur weltweit führenden Gruppe bei der Untersuchung von Ion-Molekül-Reaktionen im Labor aufgestiegen war, hatte sich gerade entschieden, ihre beträchtlichen experimentellen Fähigkeiten auf Studien zur Stratosphärenchemie auszuweiten. Meine Aufgabe bestand darin, sie in diese Richtung zu leiten. Ich bin immer noch stolz darauf, daß ich an dieser höchst bemerkenswerten Umwandlung beteiligt war. Zusammen mit Eldon Ferguson lieferten Wissenschaftler wie Dan Albritton, Art Schmeltekopf, Fred Fehsenfeld, Paul Goldan, Carl Howard, George Reid, John Noxon und Dieter Kley schnell wichtige Beiträge zur Stratosphärenforschung; dazu gehörten Aktivitäten wie die Luftprobennahme mit ballongetragenen Vakuumkammern (sogenannten Salatschüsseln) für spätere gaschromatographische Analysen, optische Messungen der vertikalen Säule und Verteilung von NO_2 und NO_3 (später von Susan Solomon auf BrO und ClO_2 ausgedehnt), der Entwurf und Einsatz eines Gerätes für die Messung von extrem niedrigen Wasser-Mischungsverhältnissen sowie die Ermittlung bis dahin ungenügend bekannter Geschwindigkeitskonstanten wichtiger Reaktionen im Labor. In späteren Jahren widmete sich die NOAA-Gruppe auch Studien der Troposphärenchemie und erlangte in diesem Forschungsgebiet ebenfalls eine herausragende Bedeutung. Bei der NCAR-Gruppe lag der Schwerpunkt eher bei den IR-Messungen von John Gille und Bill Mankin, aus denen sich auch satellitengetragene Experimente entwickelten.

Eine andere herausragende Aktivität war die Analyse der vertikalen Verteilungen weniger reaktiver Gase wie CH_4 , H_2O , N_2O und der FCKWs auf der Basis der kryogenen Probennahmetechnik, die von Ed Martell und Dieter Ehhalt entwickelt worden war.

Im Jahr 1977 wurde ich Direktor der Air Quality Division bei NCAR, meine erste teilweise mit Verwaltungsaufgaben verbundene Stelle. Dennoch setzte ich meine wissenschaftlichen Arbeiten fort, was viele für nicht möglich gehalten hatten. Glücklicherweise hatte ich in Nelder Medrud einen sehr kompetenten Verwaltungsbeamten. In meiner Position als Direktor förderte ich sowohl Arbeiten zur Stratosphären- als auch solche zur Troposphärenchemie. Ich selbst widmete mich hauptsächlich der Entwicklung von photochemischen Modellen, und zwar vorwiegend gemeinsam mit meinen Studenten Jack Fishman, Susan Solomon und Bob Chatfield. Zusammen mit Pat Zimmerman begannen wir Studien über die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Biosphäre, und hier besonders über den Eintrag von Kohlenwasserstoffen in die Atmosphäre aus der Vegetation und durch Biomassenverbrennung in den Tropen. Außerdem versuchte ich, die Zusammenarbeit zwischen Atmosphärenchemikern und Meteorologen zu verstärken, um die Interpretation chemischer Messungen bei Feldexperimenten zu verbessern. Es war damals eine Herausforderung, diese interdisziplinäre Forschung in Gang zu bringen.

Als Teil verschiedener amerikanischer und internationaler Aktivitäten waren viele meiner Forschungsprojekte während dieser Zeit auf das Thema der anthropogenen, chlorkatalysierten Ozonzerstörung gerichtet. Da ich aber sicher bin, daß dieses Thema von meinen Mit-Nobelpreisträgern ausführlich behandelt wird, mache ich einen Sprung in das Jahr 1985. Damals veröffentlichten Joe Farman und seine Kollegen [57] vom British Antarctic Survey ihre bemerkenswerten Datenreihen zur vertikalen Ozonsäule im Oktober über der Station Halley Bay, die ab der zweiten Hälfte der siebziger Jahre einen schnellen mittleren Abbau von mehr als 3% pro Jahr zeigten. Obwohl ihre Erklärung falsch war (ClO_x/NO_x -Wechselwirkungen), vermuteten Farman et al. richtig einen Zusammenhang mit dem kontinuierlichen Anstieg des stratosphärischen Chlors (zur Zeit sind, verglichen mit dem natürlichen Niveau, etwa fünfmal höhere Konzentrationen erreicht). Ihre Darstellung des Ozon-Abwärtstrends passend zu den Aufwärtstrends der FCKWs (bei geeigneter Skalierung) war wirklich sehr suggestiv.

Die Entdeckung des Ozonlochs geschah in einer Zeit, in der ich stark in mehrere internationale Studien über mögliche Umweltfolgen eines Atomkrieges zwischen der NATO und den Staaten des Warschauer Paktes eingebunden war, was ich in einem der folgenden Abschnitte kurz beschreiben werde. Da sich sehr viele Forscher umgehend mit dem Ozonloch beschäftigten, tat ich dies zunächst nicht. Dann nahm ich Anfang 1986 an einem Workshop in Boulder (Colorado) teil, der mich auf den aktuellen Stand der verschiedenen Theorien brachte, die zur Erklärung dieses Phänomens vorgeschlagen worden waren. Es zeigte sich, daß einige Hypothesen Teilwahrheiten enthielten, insbesondere die Idee von Solomon et al. [58], daß einer Chloraktivierung an der Oberfläche von stratosphärischen Eispartikeln durch die Reaktion (23) die schnelle Photolyse von Cl_2 in hochreaktive Chloratome folgt [Gl. (24)].

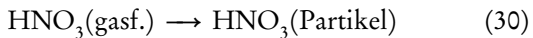
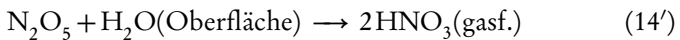
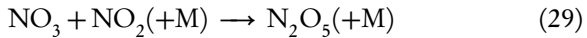
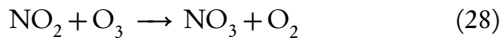
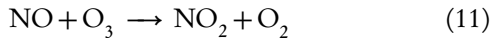


Dennoch war ich unzufrieden mit der Behandlung der Chemie in heterogener Phase. Auf meinem Flug zurück nach Deutschland (ich schlafe fast nie auf Transatlantik-Flügen) hatte ich viel Zeit, noch einmal darüber nachzudenken, und mir wurde plötzlich klar, daß, falls HNO_3 und NO_x aus der Gasphase in die feste Phase ausgefroren würden, ein wichtiger Schutz gegen den Angriff von ClO_x auf O_3 wegfiel. Das funktionierte folgendermaßen: Unter normalen Stratosphärenbedingungen gibt es starke Wechselwirkungen zwischen den NO_x - und ClO_x -Radikalen, die das Ozon vor sonst noch größerer Zerstörung schützen. Wichtige Beispiele dafür sind die Reaktionen (25)-(27), die HCl und ClONO_2 liefern, welche nicht mit Ozon reagieren.

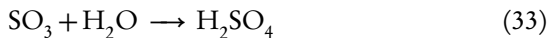
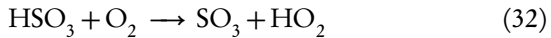
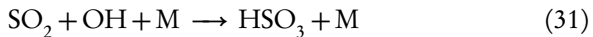


Durch diese Reaktionen liegt der größte Teil des anorganischen Chlors unter normalen Stratosphärenbedingungen als HCl und ClONO_2 vor. Zum Vorteil von Ozon kämpfen ClO_x und NO_x wie zwei Mafia-Familien gegeneinander. Abbildung 8 ist zu entnehmen, daß es viele

komplexe Wechselwirkungen zwischen den OX-, HX-, NX- und ClX-Familien gibt. Wenn nun die NX-Verbindungen aus der Gasphase entfernt würden, fänden die Reaktionen (25)–(27) nicht statt, und das meiste anorganische Chlor wäre in aktivierten Formen verfügbar. Während meines Rückfluges nach Deutschland begann ich, über diese Möglichkeit nachzudenken. Zunächst werden alle NO_x -Verbindungen in HNO_3 umgewandelt, entweder über die Reaktion (10a) oder, besonders in der langen Polarnacht, durch die Nacht-Reaktionen (11), (14') und (28)–(30).



Wie bereits früher angemerkt, findet Reaktion (14) in der Gasphase nicht statt, jedoch leicht auf wasserhaltigen Teilchenoberflächen [Gleichung (14')]. Solche Teilchen sind in der unteren Stratosphäre stets in Form von Sulfataerosolen vorhanden, was von Christian Junge entdeckt wurde, einem der Pioniere in der Atmosphärenchemie und mein Vorgänger als Direktor des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz [59]. Die Sulfataerosole werden durch die Nucleation gasförmiger H_2SO_4 gebildet, die aus der Reaktion von SO_2 mit OH hervorgeht [Gl. (31)–(33)] [60, 61].



Die Quellen für stratosphärisches SO_2 sind entweder Vulkanausbrüche [59] oder die Oxidation von OCS [Gl. (34)–(36)], das an der Erdoberfläche gebildet wird [62].



Die Möglichkeit der HNO_3 -Bildung durch heterogene Reaktionen auf Sulfataerosolen wurde schon 1975 in einer Veröffentlichung erwogen, bei der ich Mitautor von Richard Cadle und Dieter Ehhalt war [63]. Diese Reaktion wurde lange Zeit aufgrund von Labormessungen für unbedeutend gehalten, bis entdeckt wurde, daß diese Messungen grob falsch waren und daß Reaktion (14) bereitwillig auf wasserhaltigen Oberflächen abläuft [64-66]. Frühere Messungen in der Troposphäre hatten jedoch auch schon darauf hingewiesen [67]. Reaktion (14') hat eine signifikante Umwandlung von reaktivem NO_x in weniger reaktive HNO_3 zur Folge und vermindert daher die Bedeutung von NO_x in der Ozonchemie, besonders in der unteren Stratosphäre. Die Berücksichtigung von Reaktion (14') führte zu einer besseren Übereinstimmung von Theorie und Experiment [68]. Diese Erfahrung zeigt einmal mehr, wie wichtig gute Meßdaten sind – es ist besser, überhaupt keine zu haben als schlechte!

Sobald ich zurück in Mainz war, sprach ich mit Frank Arnold vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und erläuterte ihm meine Idee des NO_x -Entfernens aus der Gasphase. Nach ungefähr einer Woche hatte er gezeigt, daß unter Stratosphärenbedingungen feste Salpetersäure-Trihydrat-Partikel (nitric acid trihydrate, NAT) bei Temperaturen unter etwa 200 K gebildet werden können, was ungefähr 10 K über der Temperatur liegt, die zur Bildung von Wassereis-Teilchen nötig ist. Unsere Ergebnisse wurden Ende 1986 in *Nature* veröffentlicht [69]. Unabhängig davon war diese Idee auch von Brian Toon, Rich Turco und Mitarbeitern entwickelt worden [70]. Daran anschließend lieferten vor allem Laborexperimente von David Hanson und Konrad Mauersberger [71], damals an der University of Minnesota, genaue Informationen über die thermodynamischen Eigenschaften von NAT. Als nächstes wurde gezeigt, daß NAT-Teilchen auch ausreichend Oberfläche liefern könnten, um die ClO_x -Produktion durch die Reaktionen (23) und (24) zu katalysieren [72, 73]. Schließlich schlugen Molina und Molina [74] einen sehr effektiven Reaktionscyclus vor, der die ClO -Dimerisierung einschließt und einen schnellen Ozonabbau unter kalten, stratosphärischen Tageslichtbedingungen bewirkt [Gl. (21), (37), (38)].

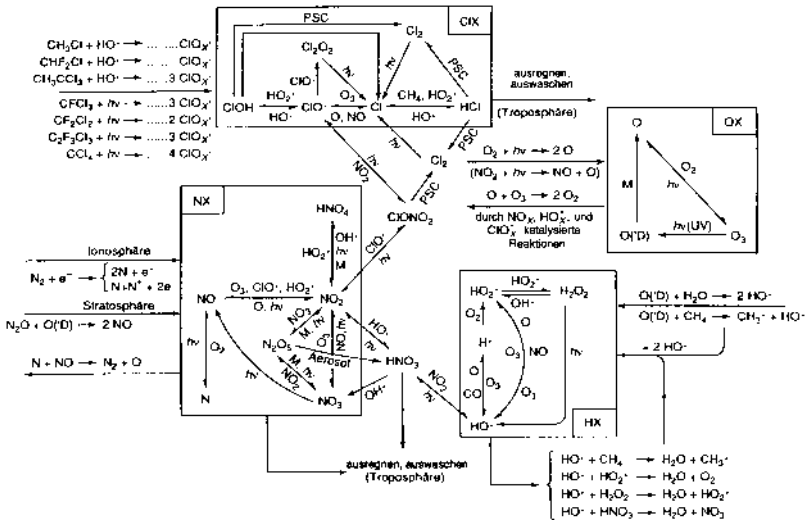
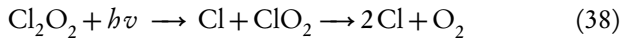
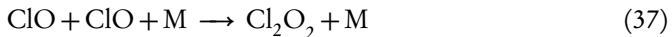


Abbildung 8: Schematische Darstellung der chemischen Wechselwirkungen in der Stratosphäre. Zu Beginn meiner wissenschaftlichen Karriere waren nur die OX- und einige der HX-Reaktionen bekannt. OX steht für die »Odd-oxygen«-Verbindungen, HX für H, OH, HO₂ und H₂O₂, NX für N, NO, NO₂, NO₃, N₂O₅, HNO₃ und HNO₄, ClX für alle anorganischen Chlorverbindungen (Cl, ClO, Cl₂O₂, ClONO₂, HCl, OClO und Cl₂). Die Bromverbindungen, die ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre spielen, sind nicht berücksichtigt. PSC = polare Stratosphärenwolken (polar stratospheric clouds).



Man erkennt, daß die Ozonzerstörung aufgrund von Reaktion (37) proportional zum Quadrat der ClO-Konzentration ist. Da außerdem die Bildung von elementarem Chlor durch Reaktion (23) nichtlinear vom stratosphärischen Chlorgehalt abhängt, ist hiermit ein sehr effektives nichtlineares System mit positiver Rückkopplung geschaffen, das für die beschleunigte Ozonzerstörung unter Ozonloch-Bedingungen ursächlich ist. Das Ozonloch ist ein drastisches Beispiel für eine vom Menschen erzeugte chemische Instabilität, die sich an einem Ort

ausbildete, der am denkbar weitesten entfernt von den industriellen Emissionen der für diesen Effekt verantwortlichen chemischen Stoffe ist.

Die Allgemeingültigkeit der Abfolge von Ereignissen, die zur Chloraktivierung führen, wurde durch Beobachtungen der Radikale bestätigt, sowohl mit Hilfe von Fernerkundung vom Erdboden [75, 76] als auch mit flugzeuggetragenen In-situ-Messungen [77]. Besonders die letzteren, die von James Anderson und seinen Studenten von der Harvard University durchgeführt wurden, waren sehr aufschlußreich, da sie die Koinzidenz einer großen Zunahme der ClO-Konzentrationen in der kalten, polaren Region der unteren Stratosphäre und einer schnellen Abnahme der Ozonkonzentrationen zeigten. Zusammen mit anderen Beobachtungen bestätigt dies die oben beschriebene Theorie der Ozonzerstörung. In der Zwischenzeit ist die Bedeutung dieses globalen Problems von allen Ländern der Welt anerkannt worden, und es wurden internationale Abkommen unterzeichnet, welche die Produktion der FCKWs und der Halone ab 1995 stoppen sollen. Hier, wo die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung selbst für Laien sehr deutlich ist, deprimiert es enorm zu sehen, daß sie von einer kleinen Gruppe sehr lauter Kritiker, die keine Leistungen in diesem Forschungsfeld erbracht haben, noch immer nicht akzeptiert wird. Einige von ihnen sind kürzlich sogar in den US-Kongreß gewählt worden.

Und alles hätte noch schlimmer kommen können

Das stratosphärische Ozon sollte sich nun langsam über den Zeitraum eines Jahrhunderts wieder erholen. Dennoch war es sehr knapp. Hätten Joe Farman und seine Kollegen von der British Antarctic Survey nicht seit 1958/59, dem internationalen Jahr der Geophysik, all die Jahre ihre Messungen in der rauen Antarktis durchgeführt, wäre die Entdeckung des Ozonlochs wohl beträchtlich verzögert worden, und es hätte eine viel geringere Dringlichkeit bei der Durchsetzung der internationalen Abkommen zum Abbau der FCKW-Produktion geherrscht. Es hätte daher ein immenses Risiko bestanden, daß sich auch in höheren Breiten der Nordhemisphäre ein Ozonloch entwickelte.

Während die Ausbildung einer Instabilität im System O_x-ClO_x eine Chloraktivierung durch heterogene Reaktionen auf festen oder unterkühlten flüssigen Partikeln voraussetzt, ist dies für anorganische Bromverbindungen nicht der Fall, da Brom aufgrund photochemischer Gasphasen-Reaktionen normalerweise vorwiegend in aktiver Form in der Atmosphäre vorkommt. Daher ist Brom für Ozon fast hundertmal gefährlicher als Chlor bezogen auf die gleiche Zahl Atome [52, 78]. Das führt zu dem erschreckenden Gedanken, daß wenn die chemische Industrie organische Bromverbindungen anstatt der FCKWs entwickelt hätte – oder wenn die Chlorchemie der Bromchemie ähnlicher wäre –, wir völlig unvorbereitet schon in den siebziger Jahren einem katastrophalen Ozonloch überall und zu allen Jahreszeiten ausgesetzt gewesen wären, wahrscheinlich bevor Atmosphärenchemiker das notwendige Wissen gehabt hätten, die Probleme zu identifizieren, und die geeigneten Techniken für die schwierigen notwendigen Messungen entwickelt hätten. Da sich vor 1974 niemand Sorgen um die Konsequenzen des Chlor- und Bromeintrags in die Atmosphäre gemacht hatte, kann ich nur schließen, daß wir viel Glück gehabt haben. Dies zeigt, daß wir allzeit auf der Hut sein sollten bezüglich möglicher Folgen des Eintrags neuer Produkte in die Umwelt. Eine permanente Überwachung der Zusammensetzung der Stratosphäre behält daher für viele kommende Jahre eine hohe Priorität.

Mittlerweile wissen wir, daß das Gefrieren von $H_2SO_4-HNO_3-H_2O$ -Mischungen unter Bildung von NAT-Partikeln nicht immer stattfindet, sondern daß in der Stratosphäre flüssige, weit unter die Nucleationstemperatur unterkühlte Tröpfchen bis zum Frostpunkt von Eis existieren können [79]. Dies kann einen großen Einfluß auf die Chloraktivierung haben [80, 81]. Dieses Thema und seine Bedeutung für heterogene Prozesse wurden an mehreren Laboratorien vor allem in den USA studiert, besonders durch die Gruppen von A. R. Ravishankara am Aeronomy Laboratory der NOAA, Margaret Tolbert an der University of Colorado, Mario Molina am MIT, Doug Worsnop und Chuck Kolb bei Aerodyne in Boston und Dave Golden am Stanford Research Institute in Palo Alto. Ich bin sehr froh, daß auch am Max-Planck-Institut für Chemie eine Gruppe unter der Leitung von Dr. Thomas Peter erfolgreich experimentelle und theoretische Studien über die physikalischen und chemischen Eigenschaften stratosphärischer Teilchen bei niedrigen Temperaturen durchführt. Eine sehr aufregende neue Entdeckung dieser Arbeiten ist, daß das Gefrieren unterkühlter ternärer

H_2SO_4 – HNO_3 – H_2O -Lösungen an sehr kleinen Aerosolen beginnen könnte, wenn Luftpakete eine orographisch ausgelöste Abkühlung erfahren. Unter diesen Bedingungen werden die normalerweise hauptsächlich aus H_2SO_4 und H_2O bestehenden kleineren Teilchen sehr schnell mit HNO_3 und H_2O verdünnt und erreichen chemische Zusammensetzungen, die der Stöchiometrie des NAT-Aerosols entsprechen, das nach Laborstudien sehr leicht gefrieren kann [82, 83].

Biomassenverbrennung in den Tropen

Ende der siebziger Jahre wurde der Möglichkeit, daß das Abholzen tropischer Wälder eine wesentliche Quelle für atmosphärisches CO_2 sein könnte, große Aufmerksamkeit geschenkt [84]. Biomassenverbrennung ist jedoch nicht nur eine Quelle für CO_2 , sondern auch für eine große Zahl photochemisch aktiver Spurengase wie NO_x , CO , CH_4 , reaktive Kohlenwasserstoffe, H_2 , N_2O , OCS und CH_3Cl . Außerdem findet Biomassenverbrennung nicht nur beim Heizen/Kochen mit Holz statt, sondern ist auch eine normale landwirtschaftliche Aktivität, z. B. das Verbrennen von Savannengräsern, Holz und landwirtschaftlichem Abfall. Im Sommer 1978, auf unserem Rückweg nach Boulder von Messungen der OCS - und N_2O -Emissionen aus Viehkoppeln im Nordosten von Colorado, sahen wir ein großes Waldfeuer ganz oben im Rocky Mountain National Forest, was uns die Möglichkeit gab, Luftproben von der Rauchfahne eines größeren Waldfeuers zu sammeln. Chemische Analyse in den NCAR-Labors durch Leroy Heidt, Walt Pollock und Rich Lueb lieferte die emittierte Menge der obigen Gase relativ zu der von CO_2 . Durch Multiplikation dieser Zahlen mit der geschätzten weltweiten CO_2 -Produktion durch Biomassenverbrennung, größenordnungsmäßig 2×10^{15} – 4×10^{15} g C pro Jahr [85], leiteten wir erste Schätzwerte der weltweit emittierten H_2 -, CH_4 -, CO -, N_2O -, NO_x -, OCS - und CH_3Cl -Mengen ab und konnten zeigen, daß diese Emissionen einen signifikanten Beitrag zum Gesamtbestand dieser Gase in der Atmosphäre leisten sollten. Diese ersten Ergebnisse regten intensive internationale Forschungsaktivitäten an. Außer für N_2O (für das sich unsere ersten Messungen als falsch herausstellten) wurden unsere damaligen Ergebnisse weitestgehend bestätigt, obwohl immer noch

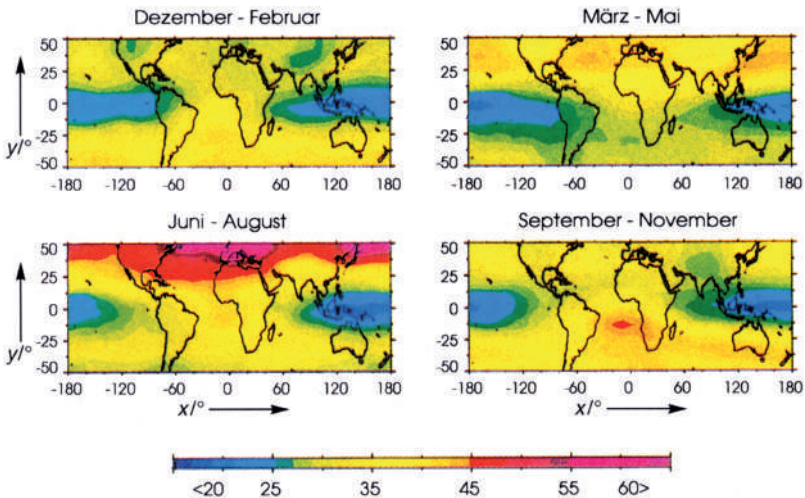


Abbildung 9: Beobachtete Verteilungen der vertikalen Ozonsäule in der Troposphäre im Jahr 1994 je nach Jahreszeit (aus [91, 93]). Die Farbskala ist in Dobson-Einheiten skaliert. x = geographische Länge; y = geographische Breite.

große Unsicherheiten in der Quantifizierung des Anteils verschiedener menschlicher Aktivitäten an der Biomassenverbrennung und von individuellen Gaseinträgen bestehen [86]. Da bei der Biomassenverbrennung beträchtliche Mengen reaktiver Spurengase wie Kohlenwasserstoffe, CO und NO_x in photochemisch sehr aktiven Umgebungen frei werden, wurde die Bildung großer Ozonmengen in den Tropen und Subtropen während der Trockenzeit erwartet. Diese Erwartungen wurden durch mehrere Meßkampagnen in Südamerika und Afrika bestätigt, die 1979 und 1980 mit der Expedition Quemadas von NCAR in Brasilien begonnen hatten [87-92]. Die Auswirkungen der Biomassenverbrennung zeigen sich besonders in der wenig industriell verschmutzten Südhemisphäre, wie man deutlich aus Satellitenbeobachtungen der troposphärischen Säulen von O_3 und CO sieht (Abb. 9 bzw. 10) [93, 94].

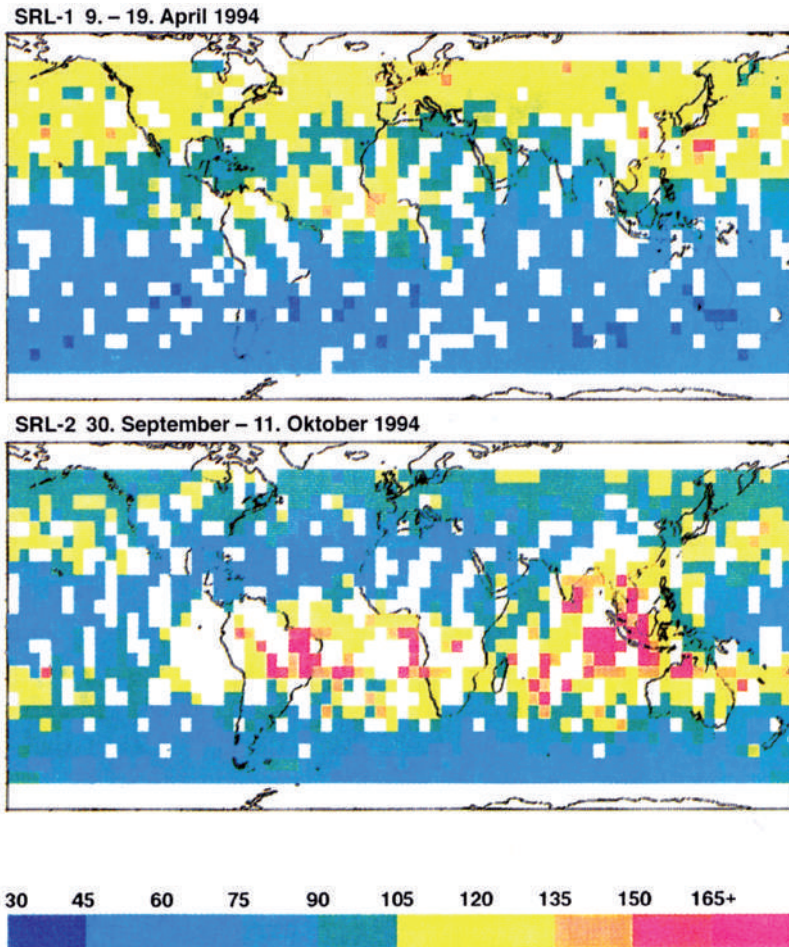


Abbildung 10: Beobachtete Verteilungen der vertikalen CO-Säule in der Troposphäre, gemessen im April und Oktober 1994 vom Space Shuttle aus (mit freundlicher Genehmigung von Dr. Vicki Connors, Dr. Hans Reichle und dem MAPS-Team [94]). Die Farbskala ist mit dem Volumenmischungsverhältnis in ppb (nmol pro mol) skaliert.

Der nukleare Winter

Mein wissenschaftliches Interesse sowohl am Einfluß von NO_x auf stratosphärisches Ozon als auch an der Biomassenverbrennung erklärt meine Beteiligung an den Studien über den »nuklearen Winter«. 1981

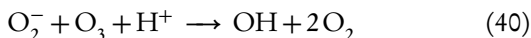
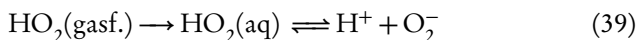
wurde ich vom Herausgeber der Zeitschrift *Ambio* gebeten, einen Beitrag für die Sonderausgabe über die Umweltkonsequenzen eines Atomkrieges zu verfassen. Diese Ausgabe wurde von Dr. Joseph Rotblat, dem diesjährigen Friedensnobelpreisträger, mitherausgegeben. Meine erste Idee war, die Vorhersagen zur Ozonzerstörung durch Berücksichtigung des in den Feuerbällen von Atombombenexplosionen erzeugten und von diesen in die Stratosphäre transportierten NO_x auf den neuesten Stand zu bringen [95, 96]. Einer der Mitautoren der Studie von Johnston [96], Prof. John Birks von der University of Colorado in Boulder, der ein Freisemester in meiner Arbeitsgruppe in Mainz verbrachte, schloß sich mir für diese Studie an. Obwohl die Ozonabnahmen signifikant waren, wurde auch klar, daß diese Auswirkungen nicht mit den direkten Einflüssen nuklearer Explosionen vergleichbar sind. Doch dann begannen wir, über die potentiellen Auswirkungen der großen Mengen Ruß aus den Rauchwolken der Brände in Wäldern, Städten, Industriegebieten und Öltankanlagen, die bis in die mittlere und obere Troposphäre gelangen würden, auf das Klima nachzudenken. Unsere Schlußfolgerung war, daß die Absorption des Sonnenlichtes durch die schwarzen Rauchwolken zu Dunkelheit und starker Abkühlung auf der Erdoberfläche führen könnte sowie zu einer Erwärmung der Atmosphäre in höheren Schichten, was sehr untypische meteorologische und klimatische Bedingungen schüfe, die die landwirtschaftliche Produktion eines großen Teils der Weltbevölkerung gefährden könnte [97]. Diese Idee wurde von anderen aufgegriffen, vor allem von der TTAPS-Gruppe (Turco, Toon, Ackerman, Pollack, Sagan) [98], die vorhersagte, daß für einen großen Teil der Erde sogar Temperaturen unter dem Gefrierpunkt möglich wären. Diese Annahme wurde durch Klimamodellierungen gestützt [99]. Auch eine umfangreiche internationale Studie zu diesem Thema unter der Schirmherrschaft des Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) des International Council of Scientific Unions (ICSU) stützte die ursprüngliche Hypothese und ließ den Schluß zu, daß mehr Menschen an den Klima- und Umweltauswirkungen eines Atomkrieges sterben könnten als direkt durch die Explosionen [100, 101].

Obwohl ich die Theorie des nuklearen Winters nicht zu meinen größten wissenschaftlichen Errungenschaften zähle (tatsächlich kann die Hypothese nicht überprüft werden, ohne das »Experiment« durchzuführen), bin ich überzeugt, daß sie vom politischen Standpunkt aus bei weitem die wichtigste war, da sie die Gefahren eines Atomkrieges

verdeutlichte und mich überzeugte, daß die Menschheit auf lange Sicht den entsetzlichen Folgen eines Atomkrieges nur entkommen kann, wenn alle Kernwaffen aufgrund eines internationalen Abkommens vernichtet werden. Daher stimme ich in diesem Punkt vollkommen mit Joseph Rotblat und der Pugwash-Organisation überein, den diesjährigen Friedensnobelpreisträgern.

Meine derzeitigen wissenschaftlichen Interessen

Nachdem mir die Wichtigkeit der heterogenen Reaktionen in der Stratosphärenchemie deutlich geworden war, beschäftigte ich mich zusammen mit meinen holländischen Studenten Jos Lelieveld (jetzt Professor an der Universität Utrecht) und Frank Dentener mit den Auswirkungen von Reaktionen, die sich in Wolkentröpfchen und troposphärischen Aerosolpartikeln abspielen. Allgemein führen solche Reaktionen zum Entfernen von NO_x und zu niedrigeren Konzentrationen von O_3 und OH [102, 103]. Auch wenn ausreichend hohe NO_x -Konzentrationen für die Ozonbildung durch die Reaktionen (16'), (17) und (2) vorhanden wären, ist die Startreaktion (16') in Wolken stark eingeschränkt, da die nur schwach wasserlöslichen NO_x -Moleküle in der Gasphase bleiben, während sich die HO_2 -Radikale leicht in den Wolkentröpfchen lösen [Gl. (39)]. Dort können sie Ozon durch Reaktion (40) abbauen.



In den letzten zehn Jahren beschäftigte ich mich außerdem gemeinsam mit einigen Studenten mit der Rolle des schnellen Transports reaktiver Verbindungen von der planetaren Grenzschicht in die obere Troposphäre. Dieser könnte wichtige Auswirkungen auf die Chemie der oberen Troposphäre haben [104, 105]. Mein großes Interesse an der Rolle der Wolken in der Atmosphärenchemie brachte mich in engen Kontakt mit einer bedeutenden Forschungsgruppe an der University of California in San Diego unter der Leitung meines guten Freundes Prof. V. Ramanathan.

Ein neues Projekt, das mich zur Zeit sehr interessiert, ist die Möglichkeit der Chlor- und besonders der Bromaktivierung in der maritimen Grenzschicht. Man weiß bereits, daß die Bromaktivierung die äußerst geringen Ozonkonzentrationen erklären kann, wie sie oft in hohen Breiten im Frühling in maritimen Grenzschichten beobachtet werden [106]. In einer unserer neuesten Veröffentlichungen diskutieren wir die Möglichkeit, daß eine Bromaktivierung auch in anderen Meeresregionen und zu anderen Jahreszeiten auftreten kann [107, 108].

Die oben beschriebenen Ideen werden in Feldmeßkampagnen überprüft und, falls sie sich bestätigen, in weiterentwickelte Modelle für den photochemischen Transport eingebaut werden. Die Feldmessungen werden hauptsächlich von Mitgliedern meiner Abteilung am Max-Planck-Institut für Chemie durchgeführt, meist in Zusammenarbeit mit anderen experimentell arbeitenden Forschungsgruppen. An der Modellentwicklung arbeitet eine Gruppe von Wissenschaftlern aus Schweden, Holland, Frankreich, Italien und Deutschland. Dieses Programm wird von der Europäischen Union gefördert und von den Professoren Lennart Bengtsson in Hamburg, Henning Rodhe in Stockholm und Jos Lelieveld in Utrecht koordiniert.

Ausblick

Trotz der großen Fortschritte in den letzten Jahrzehnten ist noch viel Forschung nötig, um wesentliche Lücken in unserem Verständnis der Atmosphärenchemie zu schließen. Zum Schluß möchte ich auf einige dieser Forschungsfelder hinweisen, die ich für die interessantesten Gebiete halte [109].

Beobachtungen des troposphärischen Ozons

Trotz der Wichtigkeit von troposphärischem Ozon in der Atmosphärenchemie gibt es noch immer größere Unsicherheiten bezüglich seines Haushaltes und seiner globalen Konzentrationsverteilung. Es fehlt überall an Daten über Ozonkonzentrationen in der Troposphäre, besonders jedoch in den Tropen und Subtropen. Bedenkt man die große Bedeutung des Ozons in den Tropen für die Oxidationseffizienz der

Atmosphäre, die schon erwähnten erheblichen Auswirkungen der anthropogenen Biomassenverbrennung auf den Ozongehalt und die zu erwartende Expansion menschlicher Aktivitäten in Landwirtschaft und Industrie in diesem Teil der Welt, so ist diese Wissenslücke als sehr schwerwiegend einzustufen. Zur Zeit ist es mangels Ozonbeobachtungen, besonders in den Tropen und Subtropen, nicht möglich, die Modelle für den photochemischen Transport zu validieren. Von entscheidender Bedeutung für die Bemühungen, diese Daten zu gewinnen, ist *die Ausbildung und die aktive Teilnahme von Wissenschaftlern aus den Entwicklungsländern*. Neben Ozonmessungen in einer großen Zahl von Meßstationen während ausgedehnter Meßkampagnen werden auch Messungen von reaktiven Kohlenwasserstoffen, CO, NO_x, NX und der chemischen Zusammensetzung des Niederschlags wichtig sein. Sehr enttäuschend ist hier die geringe Bereitschaft der potentiellen Geldgeber, Bemühungen in diese Richtung zu unterstützen.

Langzeitbeobachtungen von Eigenschaften der Atmosphäre

Zwei wichtige Entdeckungen haben die Bedeutung von Langzeitbeobachtungen wichtiger atmosphärisch-chemischer Eigenschaften demonstriert. Ein Beispiel war die bereits erläuterte Entdeckung der schnellen Abnahme des Ozongehalts der Stratosphäre in den Frühlingsmonaten über der Antarktis. Ein weiteres, jüngstes Beispiel ist der unerwartet starke Einbruch in den Trends der CH₄- und CO-Konzentrationen. Am überraschendsten waren die Änderungen beim CO, für das Khalil und Rasmussen [110] einen Abwärtstrend der Bodenkonzentrationen von $(1.4 \pm 0.9)\%$ pro Jahr in der Nordhemisphäre und sogar von $(5.2 \pm 0.7)\%$ pro Jahr in der Südhemisphäre zwischen 1987 und 1992 abgeleitet haben. Novelli et al. [111] ermittelten sogar noch größere Abwärtstrends zwischen Juni 1990 und Juni 1993: $(6.1 \pm 1)\%$ pro Jahr in der Nordhemisphäre und $(7 \pm 0.6)\%$ pro Jahr in der Südhemisphäre. Obwohl sich diese Trends wieder zu den langjährigen Aufwärtstrends von $+0.7\%$ pro Jahr für CO und fast 1% pro Jahr für CH₄ [112, 113] umgekehrt haben (P. Novelli, persönliche Mitteilung), ist dieser vorübergehende Einbruch bemerkenswert.

Die Gründe für dieses überraschende Verhalten sind nicht bekannt. Sie könnten aus einer Kombination mehrerer Ursachen resultieren: 1) variable jährliche Emissionen durch Biomassenverbrennung, 2) höhere OH-Konzentrationen, vielleicht wegen des Verlusts an stratosphä-

rischem Ozon, der durch die Zunahme an reaktiver Aerosoloberfläche nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo im Juni 1991 ausgelöst wurde, 3) eine dynamische globale Umverteilung von CO, die durch die Lage und die begrenzte Zahl der Meßorte einen Anstieg vortäuschte, 4) eine Abnahme der CO-Bildung durch die Oxidation natürlicher, aus tropischen Wäldern emittierter Kohlenwasserstoffe durch veränderte Niederschlags- und Temperaturverhältnisse oder 5) am wahrscheinlichsten eine Kombination all dieser und anderer, noch unbekannter Faktoren. Im Moment können wir nur sagen, daß die Gründe für die überraschend schnellen CO-Trendänderungen nicht bekannt sind, was hauptsächlich auf das global ungenügend abdeckende Meßnetz für CO zurückzuführen ist. Dasselbe gilt für CH₄.

Detaillierte Meßkampagnen

In der Vergangenheit wurden vergleichende Feldmessungen mit detaillierten Beobachtungen aller Faktoren durchgeführt, die die Photochemie der Troposphäre beeinflussen. Diese werden auch in Zukunft, besonders in Meeres- und Festlandregionen der Tropen und Subtropen benötigt, um herauszufinden, ob man die Hauptprozesse der Chemie des Ozons und verwandter, photochemisch aktiver Verbindungen versteht. Die Anwendung von umfassenden chemischen Modellen und Transportmodellen sollte ein wichtiger Teil dieser Aktivitäten sein. Punkte, bei denen bessere Kenntnisse notwendig sind, sind insbesondere: 1) die Quantifizierung der Zufuhr von Ozon aus der Stratosphäre, 2) die Verteilungen, Quellen und Senken von CH₄, reaktiven Kohlenwasserstoffen, CO, NO_x und NX sowie 3) die Quantifizierung des natürlichen NO-Eintrags durch Blitze und aus Böden.

Transport durch Wolken

Die Rolle der Wolken beim Transport von chemischen Verbindungen wie CO, NO_x, reaktiven Kohlenwasserstoffen und deren Oxidationsprodukten von der Grenzschicht in die mittlere und obere Troposphäre (und möglicherweise in die untere Stratosphäre) sollte besser verstanden und quantifiziert werden, damit dieser Einfluß für den Einbau in aufwendige photochemische Modelle der Atmosphäre parametrisiert werden kann. Ebenso sollte die Produktion von NO durch Blitze und seine vertikale Umverteilung durch konvektive Stürme sowohl für maritime als auch für kontinentale Bedingungen viel besser quantifiziert

werden. Zur Zeit beträgt die Unsicherheit in der NO-Produktion durch Blitze mindestens einen Faktor vier.

Chemische Wechselwirkung mit Hydrometeoren

Die Wechselwirkung chemischer Verbindungen aus der Grenzschicht mit flüssigen und festen Hydrometeoren in den Wolken wird sehr wichtig sein. Es gibt beispielsweise die Frage, warum in den stark konvektiven Gebieten der kontinentalen Tropen keine starke Ozonbildung beobachtet wurde, obwohl große Mengen aus Wäldern emittierter reaktiver Kohlenwasserstoffe wie Isopren (C_5H_8) und seine Oxidationsprodukte schnell in die mittlere und obere Troposphäre angehoben werden und dort mit von Blitzen produziertem NO vermischt werden, was eigentlich besonders guten Bedingungen für die photochemische Ozonbildung entspricht. Könnte es sein, daß die erwartete Ozonbildung durch die chemische Wechselwirkung der Reaktionsprodukte aus den Kohlenwasserstoffen und NO_x mit den Hydrometeoren verhindert wird? Könnte im Wasser der Wolken und/oder auf der Oberfläche der Eisteilchen, die zum Teil mit Wasser bedeckt sein könnten [114, 115], eine signifikante Ozonzerstörung stattfinden? Solche Fragen zum möglichen Ozonabbau durch Hydrometeore sind besonders in Verbindung mit Beobachtungen von Relevanz, die Rekord-Tiefstwerte der Ozon-Volumenmischungsverhältnisse von oft unter 10 nmol pro mol für den größten Teil der troposphärischen Säule im März 1993 über einem ausgedehnten, sehr konvektiven Gebiet im Pazifischen Ozean zwischen den Fiji- und Christmas-Inseln ergaben [116]. Obwohl so niedrige Ozonmischungsverhältnisse schon an mehreren Stellen in der tropischen maritimen Grenzschicht beobachtet wurden und sie in der unteren Troposphäre durch die Reaktionen (5)-(8) erklärt werden können, sollte man sich doch vergewissern, ob diese Reaktionen allein ausreichen, die extrem niedrigen Ozonkonzentrationen in einem so großen Luftvolumen zu erklären.

Photolyseaktivität in wolkenreichen Atmosphären

Bezüglich der Photochemie, die in wolkenreicher Luft stattfindet, deuten neueste Beobachtungen von unerwartet hoher Absorption solarer Strahlung [117] darauf hin, daß möglicherweise eine Vielfachstreuung in unterbrochenen Wolkensystemen zu stark erhöhter Photolyse- und photochemischer Aktivität führen kann, was z.B. viel stärkeren

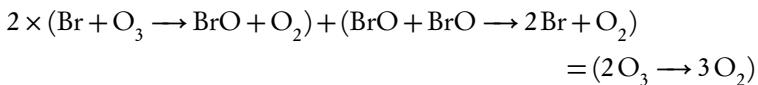
Ozonabbau und OH-Aufbau durch die Reaktionen (7) und (8) sowie Ozonaufbau durch die Reaktionen (16) + (17) + (2) bewirkte, als bisher angenommen. Der Einfluß von Wolken auf die photochemisch aktive UV-Strahlung ist ein möglicherweise sehr wichtiger Forschungsgegenstand, der durch Messungen und die Entwicklung von geeigneten Strahlungstransfermodellen verfolgt werden sollte.

Biogene Quellen für Kohlenwasserstoffe, CO und NO

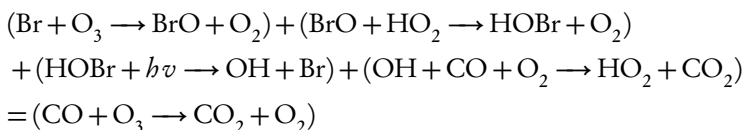
Die kontinentale Biosphäre ist eine bedeutende Quelle für Kohlenwasserstoffe. Die Quantifizierung dieser Quellen in Abhängigkeit von geophysikalischen Parametern (z. B. Temperatur, Feuchte, Lichtstärke) und biochemischen Parametern (physikalische und chemische Eigenschaften des Bodens, Landnutzung) wird dringend für den Einbau in Atmosphärenmodelle benötigt. Auch sollten die Mechanismen der Kohlenwasserstoffoxidentationen in der Atmosphäre besser verstanden werden, damit die Bildung von Ozon, CO, teilweise oxidierten, gasförmigen Kohlenwasserstoffen und organischem Aerosol genauer quantifiziert werden kann. Die Bildung von organischem Aerosol aus Kohlenwasserstoff-Vorläuferverbindungen und dessen Fähigkeit, als Kondensationskeime für Wolken zu dienen, sind verwandte, eventuell wichtige Themen, denen man sich bis jetzt überhaupt noch nicht genügend gewidmet hat.

Die mögliche Rolle von Halogenradikalen beim Ozonabbau

Es gibt starke Hinweise darauf, daß troposphärisches Ozon durch weitere als die bisher erwähnten Reaktionen abgebaut werden kann. Messungen von bodennahem Ozon während des polaren Sonnenaufgangs in der Arktis haben oft unmeßbar kleine Konzentrationen in Verbindung mit großen Mengen »filterbarem Brom« gezeigt [106]. Weitere Messungen [118] identifizierten BrO als eine der aktiven Bromverbindungen, die – wie aus Untersuchungen in der Stratosphäre bekannt ist – Ozon durch eine Serie katalytischer Reaktionen schnell abbauen können, z. B.



oder



Des weiteren sollte erkundet werden, ob Halogenaktivierungen auch unter anderen als den oben beschriebenen Umständen auftreten können [105-107].

Heterogene Reaktionen auf Aerosolteilchen

Die Wechselwirkung zwischen Gasen und dem atmosphärischen Aerosol ist weitgehend unerforscht und wird bis jetzt kaum in Troposphärenmodellen berücksichtigt. Beispiele hierfür sind die Wechselwirkungen von aus Dimethylsulfid stammenden Schwefelverbindungen mit Seesalzaerosolen in der maritimen Grenzschicht sowie die Reaktionen von SO_2 , H_2SO_4 , NO_x , N_2O_5 und HNO_3 auf Bodenstaubpartikeln, die diese Verbindungen aus der Gasphase entfernen. Im Falle des industriell erzeugten SO_2 könnte die Vernachlässigung dieser heterogenen Reaktionen durchaus zu Überschätzungen des Klimaabkühlungseffektes durch das anthropogene Aerosol geführt haben, da eine Aufnahme von Schwefel in Bodenstaub oder Seesalzaerosol die Bildung von neuen Sulfataerosolen verhindert, die das Sonnenlicht zurückstreuen.

Ozon/Klima-Rückkopplungen in der Stratosphäre

Ozon ist ein bedeutendes Treibhausgas mit einer IR-Absorptionsbande bei $9.6 \mu\text{m}$, d. h. innerhalb des atmosphärischen Fensters. Obwohl der Ozongehalt in der Troposphäre nur etwa 10% dessen in der Stratosphäre ausmacht, ist die effektive langwellige optische Dicke des troposphärischen Ozons größer. Alle Änderungen in der Ozonkonzentration, die in der Nähe der Tropopause als Ergebnis menschlicher Aktivitäten stattfinden könnten, wären von größter Bedeutung; dazu gehören beispielsweise die durch die Emissionen von H_2O , NO , SO_2 und Partikeln einer wachsenden Flotte ziviler Flugzeuge, die in der Stratosphäre und oberen Troposphäre fliegen, ausgelöst. Diese könnten zu ansteigenden Temperaturen in der unteren Stratosphäre führen. Jedoch könnten erhöhte HNO_3 - und H_2O -Konzentrationen in der unteren Stratosphäre auch die Wahrscheinlichkeit der Bildung von polaren stratosphärischen Partikeln und der Ozonzerstörung vergrößern. Diese Kette von Ereignissen wird auch durch die Abkühlung der

Stratosphäre durch steigende CO_2 -Konzentrationen unterstützt. Dieser Abkühlungseffekt nimmt in der Stratosphäre und Mesosphäre mit steigender Höhe zu. Die Auswirkungen hiervon auf die künftige Dynamik der Stratosphäre, Mesosphäre und unteren Thermosphäre ist ebenso ein Punkt, der erhebliche Beachtung verdient. Änderungen in den chemischen Bedingungen und Strahlungsbedingungen in der unteren Stratosphäre könnten daher Rückkopplungen verursachen, die wir gut verstehen müssen, einschließlich der möglichen Auswirkungen auf die Tropopausenhöhe und -temperatur, den stratosphärischen Wasserdampf, die Wolkencharakteristik der unteren Stratosphäre und den troposphärischen Wasserkreislauf. Jüngste Beobachtungen von zunehmenden Wasserdampfkonzentrationen in der unteren Stratosphäre über Boulder verdeutlichen diesen Punkt [119]. All diese Faktoren müßten in Betracht gezogen werden, bevor Entscheidungen über ein forciertes Erweitern des Flugbetriebes in der Stratosphäre getroffen werden können.

Zunächst möchte ich meinen Eltern, meiner Frau und meiner Familie für ihre Liebe und Unterstützung danken und für die Schaffung eines privaten Umfelds, ohne das nichts gehen würde.

Des weiteren danke ich meinen Sekretärinnen Anja Wienhold und Bettina Krüger für ihre stets freundliche Art trotz harter Arbeit in manchmal chaotischen Zeiten, besonders in Verbindung mit dem »Nobelrummel«. Geoff Harris, Mark Lawrence und Jens-Uwe Grooß sage ich vielen Dank für das Korrekturlesen dieses Manuskriptes.

Ich danke meinen derzeitigen und früheren Studenten, Postdocs und Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für Chemie für ihre begeisterte Mitarbeit. Viele von ihnen sind heute Universitätsprofessoren oder Direktoren an großen wissenschaftlichen Einrichtungen. Mit den meisten bin ich immer noch in engem Kontakt, und wir sind Freunde fürs Leben.

Ich danke auch der Max-Planck-Gesellschaft und den verschiedenen Organisationen, denen ich während meiner wissenschaftlichen Laufbahn angehört habe. Sie alle waren sehr wichtig, indem sie mir Langzeitförderungen gewährten und so exzellente Möglichkeiten schufen, Forschung ohne größere Einmischung von außen zu betreiben. Ich bin besonders glücklich darüber, daß ich Mitglied des NSF Center on the role of Clouds in atmospheric Chemistry and Climate an der Scripps Institution of Oceanography (SIO) der University of California in San

Diego bin, da ich dort vieles über Wolken lerne, eines der wichtigsten Elemente des Klimasystems. Ich danke meinem guten Freund, Prof. V. Ramanathan, und der SIO für die großartige Möglichkeit, mich dort während ein paar Monaten im Jahr zu regenerieren.

Mein Dank geht auch, an meine Kollegen, Direktoren und an die Beschäftigten des Max-Planck-Instituts für Chemie, an die Universität Mainz, die Stadt Mainz und den Sonderforschungsbereich für die großartige Begrüßung und die Feier bei meiner Rückkehr nach Mainz als frischgebackener Nobelpreisträger nach einem Kurzurlaub in Spanien. Ich werde auch meine »Heimkehr« an das MISU in Stockholm nicht vergessen und nicht die Begrüßung durch meine holländischen Studenten und »Enkel« -Studenten (mit illegalem Feuerwerk) in Wageningen in Holland.

Zuletzt möchte ich den vielen Kollegen auf der ganzen Welt danken, die mir zu meinem Nobel-Preis gratuliert haben. Viele von ihnen haben selbst entscheidend zu den bemerkenswerten Fortschritten in unserem Forschungsfeld über die letzten 25 Jahre beigetragen; nur wenige von ihnen konnte ich hier erwähnen. Wie die meisten von ihnen mir geschrieben haben, ist dies ein Preis für das gesamte Gebiet der Atmosphärenchemie und Umweltforschung. Ich stimme dem voll zu und danke ihnen allen.

Und – last, but not least – ein großes Dankeschön dem Nobel-Komitee der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften. Ihre Entscheidung ist ein enormer Auftrieb für die Umweltforschung.

Übersetzt von Dr. J.-U. Grooß, Mainz

Literatur

- [1] Sweden's Case Study for the United Nations Conference on the Human Environment 1972: *Air Pollution Across National Boundaries. The Impact on the Environment of Sulfur in Air and Precipitation*, Stockholm, 1972.
- [2] »A theory of upper atmospheric ozone«: S. Chapman, *Mem. R. Soc.* 1930, 3, 103-125.
- [3] »Reconsiderations of the rate constants from the thermal decomposition of ozone«: S. W. Benson, A. E. Axworthy, *J. Chem. Phys.* 1965, 42, 2614.

- [4] »The photochemistry of atmospheric water vapour«: D. R. Bates, M. Nicolet, *J. Geophys. Res.* 1950, 55, 301.
- [5] »Studies of the reaction of excited oxygen atoms and molecules produced in the flash photolysis of ozone«: W. D. McGrath, R. G. W. Norrish, *Proc. R. Soc. London A* 1960, 254, 317.
- [6] »The photolysis of ozone by ultraviolet radiation. The photolysis of ozone mixed with certain hydrogen-containing substances«: R. G. W. Norrish, R. P. Wayne, *Proc. R. Soc. London A* 1965, 288, 361.
- [7] »Chemiluminescent emission observed in the stratosphere and mesosphere«: J. Hampson, *Les problèmes météorologiques de la stratosphère et de la mésosphère*, Presses universitaires de France, Paris, 1965, S. 393.
- [8] »Photochemistry of ozone in a moist atmosphere«: B. G. Hunt, *J. Geophys. Res.* 1966, 71, 1385.
- [9] »Determination of parameters appearing in the »dry« and »wet« photochemical theories for ozone in the stratosphere«: P. J. Crutzen, *Tellus* 1969, 21, 368-388.
- [10] »Nitric acid and nitric oxide in the lower stratosphere«: D. G. Murcray, T. G. Kyle, F. H. Murcray, W. J. Williams, *Nature* 1968, 218, 78.
- [11] »Nitric acid vapor above 19 km in the Earth's atmosphere«: P. E. Rhine, L. D. Tubbs, D. Williams, *Appl. Opt.* 1969, 8, 1501.
- [12] »The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content«: P. J. Crutzen, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1970, 96, 320-325.
- [13] »Atmospheric nitrous oxide«: D. R. Bates, P. B. Hays, *Planet. Space Sci.* 1967, 15, 189.
- [14] »Reaction of O(¹D) with N₂O«: R. I. Greenberg, J. Heicklen, *Int. J. Chem. Kinet.* 1970, 2, 185.
- [15] »Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmosphere«: P. J. Crutzen, *J. Geophys. Res.* 1971, 76, 7311.
- [16] »Nitrous oxide. A natural source of stratospheric NO«: M. B. McElroy, J. C. McConnell, *J. Atmos. Sci.* 1971, 28, 1085.
- [17] »Recent kinetic measurements on the reactions of O(³P), H and HO₂«: D. D. Davis et al., 1973, DOT-TSC-OST-73-4, S. 126.
- [18] »Improved absorption cross-sections of oxygen in the wavelength region 205-240 nm of the Herzberg Continuum«: K. Yoshino et al., *Planet. Space Sci.* 1988, 36, 1469.

- [19] »Solar irradiance in the stratosphere: Implications for the Herzberg Continuum Absorption of O₂«: J. E. Frederick, J. E. Mentall, *Geophys. Res. Lett.* 1982, 9, 461.
- [20] »The solar spectral irradiance and its action in the atmospheric photodissociation processes«: M. Nicolet, *Planet. Space Sci.* 1981, 29, 951.
- [21] »The temporal and spatial distribution of tropospheric nitrous oxide«: R. F. Weiss, *J. Geophys. Res.* 1981, 86, 7185.
- [22] SCEP (Study on Critical Environmental Problems): *Man's Impact on the Global Environment. Assessment and Recommendations for Action*, The MIT Press, Cambridge, 1970.
- [23] »Nitrogen oxides in the chemosphere«: M. Nicolet, *J. Geophys. Res.* 1965, 70, 679.
- [24] »Stratospheric ozone with added water vapour: influence of high altitude aircraft«: H. S. Harrison, *Science* 1970, 170, 734.
- [25] »Kinetics of the fast gas phase reaction between ozone and nitric oxide«: H. S. Johnston, H. J. Crosby, *J. Chem. Phys.* 1954, 22, 689.
- [26] »Working Papers for a Survey of Rate Data for Chemical Reactions in the Stratosphere«: H. S. Johnston, D. Garvin, *NBS Rep.* 1972, 10931.
- [27] »Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust«: H. S. Johnston, *J. Geophys. Res.* 1971, 173, 517.
- [28] »Atmospheric ozone«: H. S. Johnston, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 1992, 43, 1.
- [29] »Photochemistry of NO_x and HNO_x compounds«: H. S. Johnston, R. A. Graham, *Can. J. Chem.* 1974, 52, 1415.
- [30] CIAP (Climate Impact Assessment Program): *Report of Findings: The Effects of Stratospheric Pollution by Aircraft*, US Department of Transportation, Washington, DC, 1974, DOT-TSC-75-50.
- [31] COMESA (The Report of the Committee on Meteorological Effects of Stratospheric Aircraft), UK Meteorological Office, Bracknell, Großbritannien, 1975.
- [32] COVOS (Comité d'Etudes sur les Conséquences des Vols Stratosphériques), Société Météorologique de France, Boulogne, Frankreich, 1976.
- [33] *Environmental Impact of Stratospheric Flight* (Hrsg.: National Academy of Sciences), Washington, DC, 1975.

- [34] »Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide«: P. J. Crutzen, I. S. A. Isaksen, G. C. Reid, *Science* 1975, 189, 457.
- [35] »Solar proton event: Influence on stratospheric ozone«: D. F. Heath, A. J. Krueger, P. J. Crutzen, *Science* 1977, 197, 886.
- [36] »Analysis of the August 1972 solar proton event, including chlorine chemistry«: S. Solomon, P. J. Crutzen, *J. Geophys. Res.* 1981, 86, 1140.
- [37] »Normal atmosphere: Large radical and formaldehyde concentrations predicted«: H. Levy, *Science* 1971, 173, 141.
- [38] »Natural sources of atmospheric CO«: J. C. McConnell, M. B. McElroy, S. C. Wofsy, *Nature* 1971, 233, 187.
- [39] »Atmospheric trends and lifetime of trichloroethane and global average hydroxyl radical concentrations based on 1978-1994 ALE/GAGE measurements«: R. G. Prinn, R. F. Weiss, B. R. Miller, J. Huang, F. N. Alyea, D. M. Cunnold, P. J. Fraser, D. E. Hartley, P. G. Simmonds. *Science* 1995, 269, 187.
- [40] »Photochemistry of the lower troposphere«: H. Levy III, *Planet. Space Sci.* 1972, 20, 919.
- [41] »A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere«: P. J. Crutzen, *Pure Appl. Geophys.* 1973, 106-108, 1385.
- [42] »Photochemical reactions initiated by an influencing ozone in unpolluted tropospheric air«: P. J. Crutzen, *Tellus* 1974, 26, 47.
- [43] »A photochemical theory of tropospheric ozone«: W. L. Chameides, J. C. G. Walker, *J. Geophys. Res.* 1973, 78, 8751.
- [44] »The origin of ozone in the troposphere«: J. Fishman, P. J. Crutzen, *Nature* 1978, 274, 855.
- [45] »Observational and theoretical evidence in support of a significant in-situ photochemical source of tropospheric ozone«: J. Fishman, S. Solomon, P. J. Crutzen, *Tellus* 1979, 31, 432.
- [46] »Kinetics of the reaction of HO₂ radicals with NO«: C. J. Howard, K. M. Evenson, *Geophys. Res. Lett.* 1977, 4, 437.
- [47] »The effect of the HO₂ + NO reaction rate constant on one-dimensional model calculations of stratospheric ozone depletions«: P. J. Crutzen, C. J. Howard, *Pure Appl. Geophys.* 1978, 116, 497.
- [48] »The changing photochemistry of the troposphere«: P. J. Crutzen, P. H. Zimmermann, *Tellus* 1991, 43A/B, 136.

- [49] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment* (Hrsg.: J. T. Houghton et al.), Cambridge University Press, 1990, S. 365.
- [50] »Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone«: R. S. Stolarski, R. J. Cicerone, *Can. J. Chem.* 1974, 52, 1610.
- [51] »HO_x, NO_x and ClO_x: Their role in atmospheric photochemistry«: S. C. Wofsy, M. B. McElroy, *Can. J. Chem.* 1974, 52, 1582.
- [52] »A review of upper atmospheric photochemistry«: P. J. Crutzen, *Can. J. Chem.* 1974, 52, 1569.
- [53] »Halogenated hydrocarbons in and over the Atlantic«: J. E. Lovelock, R. J. Maggs, R. J. Wade, *Nature* 1973, 241, 194.
- [54] »Stratospheric sink of chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalyzed destruction of ozone«: M. J. Molina, F. S. Rowland, *Nature* 1974, 249, 810.
- [55] »Estimates of possible future ozone reductions from continued use of fluorochloro-methanes (CF₂Cl₂, CFCl₃)«: P. J. Crutzen, *Geophys. Res. Lett.* 1974, 1, 205.
- [56] »Stratospheric ozone destruction by man-made chlorofluoromethanes«: R. J. Cicerone, R. S. Stolarski, S. Walters, *Science* 1974, 185, 1165.
- [57] »Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction«: J. C. Farman, B. G. Gardiner, J. D. Shanklin, *Nature* 1985, 315, 201.
- [58] »On the depletion of Antarctic ozone«: S. Solomon, R. R. Garcia, F. S. Rowland, D. J. Wuebbles, *Nature* 1986, 321, 755.
- [59] »Stratospheric aerosols«: C. E. Junge, C. W. Chagnon, J. E. Manson, *J. Meteorol.* 1961, 18, 81.
- [60] »SO₂ oxidation via the hydroxyl radical: atmospheric fate of the HSO_x radicals«: D. D. Davis, A. R. Ravishankara, S. Fischer, *Geophys. Res. Lett.* 1979, 6, 113.
- [61] »The mechanism of the HO–SO₂ reaction«: W. R. Stockwell, J. G. Calvert, *Atmos. Environ.* 1983, 17, 2231.
- [62] »The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere«: P. J. Crutzen, *Geophys. Res. Lett.* 1976, 3, 73.
- [63] »Heterogeneous chemical reactions in the stratosphere«: R. D. Cadle, P. J. Crutzen, D. H. Ehhalt, *J. Geophys. Res.* 1975, 80, 3381.
- [64] »Reaction probabilities of N₂O₅ on aqueous aerosols«: M. Mozurkewich, J. G. Calvert, *J. Geophys. Res.* 1988, 93, 15 889.

- [65] »The reaction probabilities of ClONO_2 and N_2O_5 on 40 to 75 percent sulfuric acid solutions«: D. R. Hanson, A. R. Ravishankara, *J. Geophys. Res.* 1991, 96, 17307.
- [66] »Temperature dependence of the uptake coefficients of HNO_3 , HCl , and N_2O_5 by water droplets«: J. M. Van Doren, L. R. Watson, P. Davidovits, D. R. Worsnop, M. S. Zahniser, C. E. Kolb, *J. Phys. Chem.* 1990, 94, 3265.
- [67] »Detection of NO_3 in the polluted troposphere by differential optical absorption«: U. Platt, D. Perner, A. M. Winer, G. W. Harris, J. N. Pitts, Jr., *Geophys. Res. Lett.* 1980, 7, 89.
- [68] »Stratospheric O_3 and NO_2 observations at the southern polar circle in summer and fall 1988«: J. F. Pommereau, F. Goutail, *Geophys. Res. Lett.* 1988, 15, 895.
- [69] »Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime »ozone hole« «: P. J. Crutzen, F. Arnold, *Nature* 1986, 324, 651.
- [70] »Condensation of HNO_3 and HCl in the winter polar stratosphere«: O. B. Toon, P. Hamill, R. P. Turco, J. Pinto, *Geophys. Res. Lett.* 1986, 13, 1284.
- [71] »Vapor pressures of $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ solutions at low temperatures«: D. R. Hanson, K. Mauersberger, *J. Phys. Chem.* 1988, 92, 6167.
- [72] »Antarctic stratospheric chemistry of chlorine nitrate, hydrogen chloride and ice«: M. J. Molina, T. L. Tso, L. T. Molina, F. C.-Y. Wang, *Science* 1987, 238, 1253.
- [73] »Reaction of chlorine nitrate with hydrogen chloride and water at Antarctic stratospheric temperatures«: M. A. Tolbert, M. J. Rossi, R. Malhotra, D. M. Golden, *Science* 1987, 238, 1258.
- [74] »Production of Cl_2O_2 from the self-reaction of the ClO radical«: L. T. Molina, M. J. Molina, *J. Phys. Chem.* 1987, 91, 433.
- [75] »High concentration of chlorine monoxide at low altitudes in the Antarctic spring stratosphere, I. Diurnal variation«: R. L. de Zafra, M. Jaramillo, A. Parrish, P. M. Solomon, B. Connor, J. Barrett, *Nature* 1987, 328, 408.
- [76] »Visible spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica: Observations of OClO «: S. Solomon, G. H. Mount, R. W. Sanders, A. L. Schmeltekopf, *J. Geophys. Res.* 1987, 92, 8329.

- [77] »Ozone destruction by chlorine radicals within the Antarctic vortex: The spatial and temporal evolution of ClO–O₃ anticorrelation based on in situ ER-2 data«: J. G. Anderson, W. H. Brune, M. H. Proffitt, *J. Geophys. Res.* 1989, 94, 11465.
- [78] »The chemistry of atmospheric bromine«: S. C. Wofsy, M. B. McElroy, Y. L. Yung, *Geophys. Res. Lett.* 1975, 2, 215.
- [79] »Particle size distribution in Arctic polar stratospheric clouds, growth and freezing of sulfuric acid droplets, and implications for cloud formation«: J. E. Dye, D. Baumgardner, B. W. Gandrud, S. R. Kawa, K. K. Kelly, M. Loewenstein, G. V. Ferry, K. R. Chan, B. L. Gary, *J. Geophys. Res.* 1992, 97, 8015.
- [80] »Activation of stratospheric chlorine by reactions in liquid sulphuric acid«: R. A. Cox, A. R. MacKenzie, R. Müller, T. Peter, P. J. Crutzen, *Geophys. Res. Lett.* 1994, 21, 1439.
- [81] »Heterogeneous reactions in sulfuric acid aerosol: A framework for model calculations«: D. R. Hanson, A. R. Ravishankara, S. Solomon, *J. Geophys. Res.* 1994, 99, 3615.
- [82] »Size-dependent stratospheric droplet composition in lee wave temperature fluctuations and their potential role in PSC freezing«: S. K. Meilinger, T. Koop, B. P. Luo, T. Huthwelker, K. S. Carslaw, P. J. Crutzen, T. Peter, *Geophys. Res. Lett.* 1995, 22, 3031.
- [83] »Freezing of HNO₃/H₂SO₄/H₂O solutions at stratospheric temperatures: Nucleation statistics and Experiments«: T. Koop, B. P. Luo, U. M. Biermann, P. J. Crutzen, T. Peter, noch unveröffentlicht.
- [84] »The biota and the world carbon budget«: G. M. Woodwell, R. H. Whittaker, W. A. Reiners, G. E. Likens, C. C. Delwiche, D. B. Botkin, *Science* 1978, 199, 141.
- [85] »Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning«: W. Seiler, P. J. Crutzen, *Clim. Change* 1980, 2, 207.
- [86] »Biomass burning in the Tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles«: P. J. Crutzen, M. O. Andreae, *Science* 1990, 250, 1669.
- [87] »Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season«: P. J. Crutzen, A. C. Delany, J. Greenberg, P. Haagenson, L. Heidt, R. Lueb, W. Pollock, W. Seiler, A. Wartburg, P. Zimmerman, *J. Atmos. Chem.* 1985, 2, 233.

- [88] Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE 2A): Dry season 1985, Collection of 24 papers (*J. Geophys. Res.* 1988, 93 (D2), 1349-1624).
- [89] »Biomass burning emissions and associated haze layers over Amazonia«: M. O. Andreae et al., *J. Geophys. Res.* 1988, 93, 1509.
- [90] »Ozone and Aitken nuclei over equatorial Africa: Airborne observations during DECAFE 88«: M. O. Andreae et al., *J. Geophys. Res.* 1992, 97, 6137.
- [91] »Identification of widespread pollution in the southern hemisphere deduced from satellite analyses«: J. Fishman, K. Fakhruzaman, B. Cros, D. Nyanga, *Science* 1991, 252, 1693.
- [92] FOS/DECAFE 91 Experiment, Collection of 13 papers (*J. Atmos. Chem.* 1995, 22, 1-239).
- [93] »Probing planetary pollution from space«: J. Fishman, *Environ. Sci. Technol.* 1991, 25, 612.
- [94] »Global distribution of biomass burning and carbon monoxide in the middle troposphere during early April and October 1994«: V. Connors, M. Flood, T. Jones, B. Gormsen, S. Nolt, H. Reichle in *Biomass Burning and Global Change* (Hrsg.: J. Levine), MIT Press, 1996, im Druck.
- [95] »Stratospheric NO production from past nuclear explosions«: H. M. Foley, M. A. Ruderman, *J. Geophys. Res.* 1973, 78, 4441.
- [96] »Effects of nuclear explosions on stratospheric nitric oxide and ozone«: H. S. Johnston, G. Whitten, J. W. Birks, *J. Geophys. Res.* 1973, 78, 6107.
- [97] »The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon«: P. J. Crutzen, J. Birks, *Ambio* 1982, 12, 114.
- [98] »Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosion«: R. P. Turco, O. B. Toon, R. P. Ackerman, H. B. Pollack, C. Sagan, *Science* 1983, 222, 1283.
- [99] »Global climatic consequences of nuclear war: Simulations with three-dimensional models«: S. L. Thompson, V. Alexandrov, G. L. Stenchikov, S. H. Schneider, C. Covey, R. M. Chervin, *Ambio* 1984, 13, 236.
- [100] A. B. Pittock, T. P. Ackerman, P. J. Crutzen, M. C. MacCracken, C. S. Shapiro, R. P. Turco, *Environmental Consequences of Nuclear War, Volume I: Physical and Atmospheric Effects*, SCOPE 28, Wiley, New York, 1986.

- [101] M. A. Harwell, T. C. Hutchinson, *Environmental Consequences of Nuclear War, Volume II: Ecological and Agricultural Effects*, SCOPE 28, Wiley, New York, 1985.
- [102] »Influences of cloud photochemical processes on tropospheric ozone«: J. Lelieveld, P. J. Crutzen, *Nature* 1990, 343, 227.
- [103] »Reaction of N_2O_5 on tropospheric aerosols: Impact on the global distributions of NO_x , O_3 , and OH «: F. J. Dentener, P. J. Crutzen, *J. Geophys. Res.* 1993, 98 (D14), 7149.
- [104] »Sulfur dioxide in remote oceanic air: Cloud transport of reactive precursors«: R. Chatfield, P. J. Crutzen: *J. Geophys. Res.* 1984, 89 (D5), 711.
- [105] »Role of deep convection in the ozone budget of the troposphere«: J. Lelieveld, P. J. Crutzen, *Science* 1994, 264, 1759.
- [106] »Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere«: L. A. Barrie, J. W. Bottenheim, R. C. Schnell, P. J. Crutzen, R. A. Rasmussen, *Nature* 1988, 334, 138.
- [107] »Model study indicating halogen activation and ozone destruction in polluted air masses transported to the sea«: R. Sander, P. J. Crutzen, *J. Geophys. Res.*, im Druck.
- [108] »A new mechanism for bromine and chlorine release from sea salt aerosol in the unpolluted marine boundary layer«: R. Vogt, P. J. Crutzen, R. Sander, *Nature*, eingereicht.
- [109] »Overview of tropospheric chemistry: Developments during the past quarter century and a look ahead«: P. J. Crutzen, *Faraday Discuss.* 1995, 100, 1.
- [110] »Global decrease of atmospheric carbon monoxide«: M. A. K. Khalil, R. A. Rasmussen, *Nature* 1993, 370, 639.
- [111] »Recent changes in atmospheric carbon monoxide«: P. C. Novelli, K. A. Masario, P. P. Tans, P. M. Lang, *Science* 1994, 263, 1587.
- [112] »Secular increases in the total vertical abundances of carbon monoxide above central Europe since 1950«: R. Zander, P. Demoulin, D. H. Ehhalt, U. Schmidt, C. P. Rinsland, *J. Geophys. Res.* 1989, 94, 11021.
- [113] »Secular increases of the vertical abundance of methane derived from IR solar spectra recorded at the Jungfraujoch station«: R. Zander, P. Demoulin, D. H. Ehhalt, U. Schmidt, *J. Geophys. Res.* 1989, 94, 11029.

- [114] »Global tropospheric chemistry«: P. J. Crutzen in *Low-Temperature Chemistry of the Atmosphere* (Hrsg.: G. K. Moortgat et al.), Springer, Berlin, 1994, S. 467-498.
- [115] »Ozone in the Troposphere«: P. J. Crutzen in *Composition, Chemistry and Climate of the Atmosphere* (Hrsg.: H. B. Singh), Von Nostrand Reinhold, New York, 1995, S. 349-393.
- [116] »Extremely low upper tropospheric ozone observations in the convective regions of the Pacific«: D. Kley, H. G. J. Smit, H. Vömel, S. Oltmans, H. Grassl, V. Ramanathan, P. J. Crutzen, *Science*, eingereicht.
- [117] »Warm pool heat budget and shortwave cloud forcing: a missing physics?«: V. Ramanathan, B. Subasilar, G. J. Zhang, W. Conant, R. D. Cess, J. T. Kiehl, H. Grassl, L. Shi, *Science* 1995, 267, 499.
- [118] »Spectroscopic measurement of bromine oxide and ozone in the high Arctic during Polar Sunrise Experiment 1992«: M. Hausmann, U. Platt, *J. Geophys. Res.* 1994, 99, 25399.
- [119] »Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude northern hemisphere site from 1981 to 1994«: S. J. Oltmans, D. J. Hofmann, *Nature* 1995, 374, 146.
- [120] »A reevaluation of the ozone budget with HALOE UARS data: No evidence for the ozone deficit«: P. J. Crutzen, J. U. Groöß, C. Brühl, R. Müller, J. M. Russell III, *Science* 1995, 268, 705.
- [121] G. Lammet, P. Wiesen, *Nachr. Chem. Tech. Lab.* 1996, 44, 477.

Glas – ein alter Werkstoff aber aktuelle Physik

Fragt man allgemein: »Was ist ein Glas?«, so bekommt man zunächst den Hinweis auf das Fensterglas, also SiO_2 mit Beimengungen, oder das Trinkgefäß als Antwort. Bekannt sind diese schon seit 3000 v. Chr. und die heute so bewunderte Glasblasetechnik bei Venedig wurde schon 50 v. Chr. von den Römern entwickelt (Abb. 1).

Das wesentliche Merkmal von Gläsern ist jedoch nicht ihre Transparenz oder Sprödigkeit, es ist vielmehr die molekulare Struktur, die dem Glasbegriff zugrunde liegt. Gläser gibt es in einer Vielzahl von Materialklassen, sie sind als moderner Werkstoff bei Glasfasern, Plastiktüten, Keramiken, Holz, metallischen Systemen, Biomaterialien und in vielen anderen Beispielen zu finden (Abb. 2-5).

In (Abb. 6) sind Flüssigkeit, Glas und Kristall in einigen Eigenschaften nebeneinander dargestellt. Flüssigkeit und Glas haben im Gegensatz zum Kristall keine langreichweitige Ordnung ihrer Bausteine (Kristallstruktur) und sind allenfalls durch eine Nahordnung (ggf. auf nm-Skala) gekennzeichnet. Die Bausteine der Materie (Atome, Moleküle, Proteine etc.) sind in der Flüssigkeit leicht beweglich (z. B. Brown'sche Bewegung, ggf. auch kooperative Bewegungen s. u.), hingegen im Kristall und im Glas »eingefroren« und fest verankert. Eigentlich gehören Gläser zu den Flüssigkeiten und unterscheiden sich von diesen durch eine so langsame Dynamik ihrer molekularen Bestandteile, dass sie auf den Zeitskalen des äußeren Beobachters wie ein fester Körper wirken.

Max Born, der große Göttinger Theoretiker und Nobelpreisträger, hat daher 1939 eine Flüssigkeit »charakterisiert«, indem er ihr eine verschwindende Scherstabilität, also einen verschwindenden Schermodul zuordnete (Abb. 7). Heute wissen wir, dass dieser Schermodul frequenzabhängig ist und bei nur sehr hohen Temperaturen vollkommen verschwindet. Man spricht dann von einer »Born'schen Flüssigkeit«.

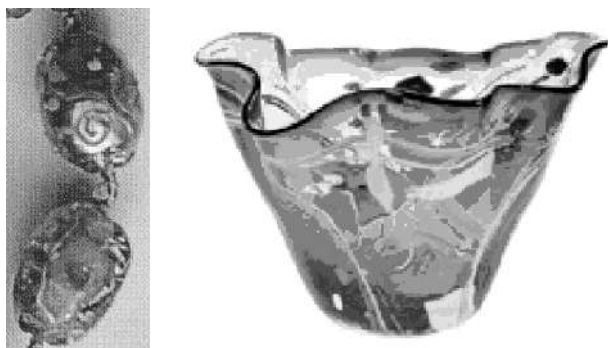


Abbildung 1: Glasschmuck aus Mesopotamien, 3000 v. Chr. (links) und römische Vase, 50 v. Chr. (rechts).

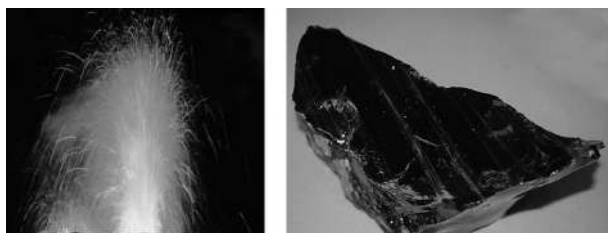


Abbildung 2: Obsidian (SiO_2 mit Fe, Mg): geschmolzene Lava, im Wasser schnell abgeschreckt.



Abbildung 3: Medizinisches Endoskop mit Glasfasern [1].

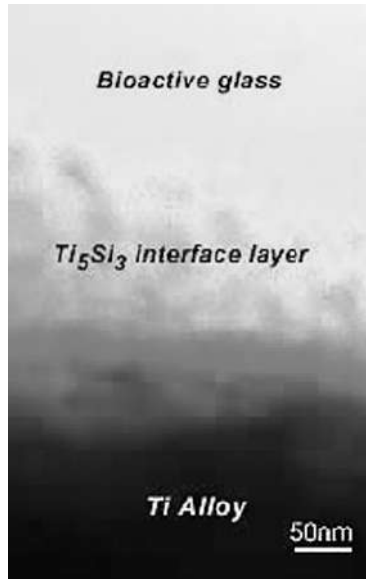


Abbildung 4: Biokompatible Beschichtung auf Knochenimplantaten [2].



Abbildung 5: Golfschläger aus einem metallenen Glas [6].

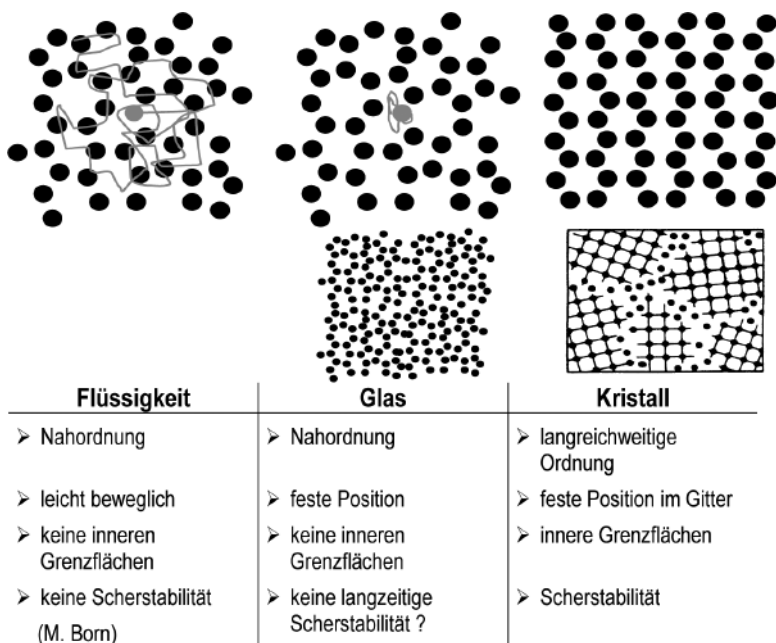


Abbildung 6: Flüssigkeit, Glas und Kristall mit einigen Eigenschaften im Vergleich.

Fest oder flüssig ist also eine Frage von Temperatur und Zeit (Frequenz), die der äußere Beobachter z. B. bei Einwirkung einer Scherspannung vorgibt und auf welcher das »amorphe« System antwortet. Die Temperaturabhängigkeit ist jedem Beobachter täglich vertraut: der Honig »fließt« offensichtlich leichter, wenn das Gefäß nicht im Kühlschrank stand. Die Frequenzabhängigkeit oder auch die Abhängigkeit von der Rate, mit der das System abgekühlt (aufgewärmt) wird, ist hingegen verblüffend und physikalisch weitaus schwieriger zu verstehen. Experimentell weiß der Glasbläser sehr wohl, wie er abzukühlen hat (s. Abb. 8), um seinen Werkstoff unter die so genannte Glasktemperatur zu bringen und somit das System zu verfestigen.

Bei der Glasktemperatur überschreitet das Material die Grenze fest-(zäh)flüssig. Sie ist abhängig von der Messmethode und der Zeitskala, auf welcher man die Charakterisierung bzgl. fest oder flüssig vornimmt. Von P. W. Anderson wurde der Mangel an Verständnis des Glasüberganges sehr deutlich kommentiert: »The deepest and most interesting

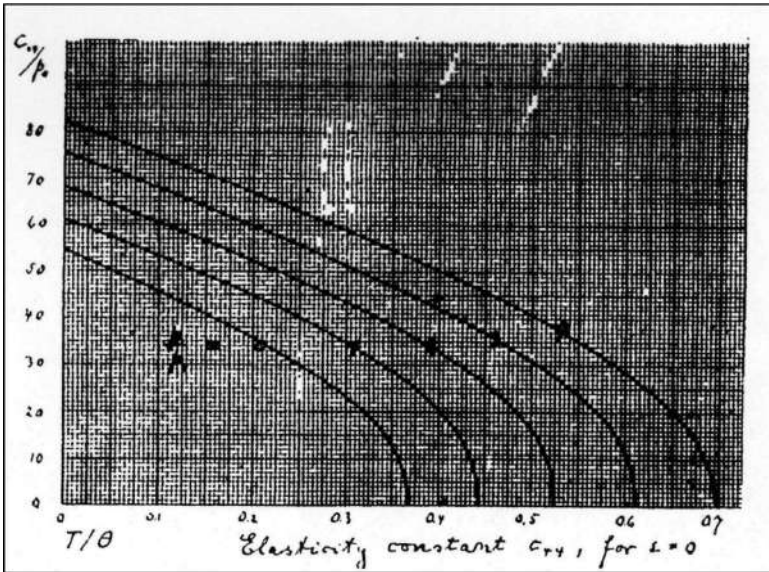


Abbildung 7: Elastische Konstante c_{44} als Funktion der reduzierten Temperatur T/θ (θ ist die Debyetemperatur) im Born'schen Modell [3].

unsolved problem in solid state theory is probably the theory of the nature of glass and the glass transition«. An dieser Aussage hat sich bis heute grundsätzlich nichts geändert, auch wenn viele Fortschritte im Verständnis gemacht worden sind.

Systematische Analysen von Austen C. Angell zeigen, dass sich die Vielzahl der Systeme in »fragile« und »starke« glasbildende Materialien unterteilen lassen (Abb. 9). Diese sind charakterisiert durch eine unterschiedliche Energielandschaft, in der sich das System befindet. Will man die räumliche Konfiguration der Bausteine ändern, wandert man in der Energielandschaft von einem Potentialminimum über einen Berg in ein neues lokales Gleichgewicht. Diese Überwindung des Potentialgebirges kostet die Arbeit, die in das System zu stecken ist. Viskoelastisches oder auch nicht – Newtonisches Fließen kann man in metallischen Schmelzen und Gläsern durch eine relativ einfache mathematische Funktion modellieren, wenn man einige generelle Kriterien anwendet.

In Abb. 10 ist ein solches Modell aus einer Zusammenarbeit mit W. L. Johnson (Caltech) dargestellt, wobei sich das Maximum der Funktion durch eine überlagerte Scherspannung unterdrücken lässt. Alle

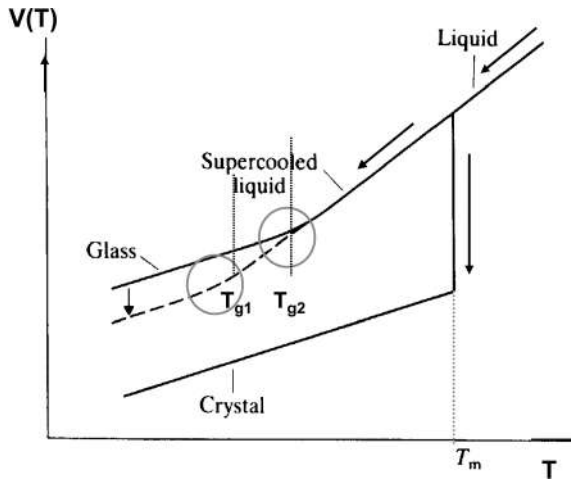


Abbildung 8: Volumen V eines Glases als Funktion der Temperatur bei der Abkühlung ($T > T_m$) und Unterkühlung ($T < T_m$) der Schmelze und zum Vergleich bei der Kristallisation. Der Glasübergang ist erkennbar an einer Änderung der Steigung der Kurve. Die Glasübergangstemperatur (T_{g1}, T_{g2}) hängt von der Abkühlrate ab [4].

bekannten metallischen Gläser sind dann auf einer universellen Kurve bezüglich ihrer Fließgrenze und Temperaturabhängigkeit beschreibbar (s. Abb. 11). Dabei ist erstaunlich, dass die Materialklasse bis auf den jeweiligen Schermodul, der von der Zusammensetzung abhängt, topologisch in einem Grenzwert bei tiefen Temperaturen zusammenfällt. Soweit es die Modellbeschreibungen hergeben, sind sie dann nur von der dichten Raumerfüllung bestimmt und nicht von den individuellen Bausteinen. Computer-Simulationen von uns und anderen Gruppen scheinen diese Ergebnisse zu bestätigen und erhärten den Befund, dass zumindest metallische Schmelzen durch kooperative Prozesse von ca. 150 Bausteinen gleichzeitig bestimmt werden und die lange untersuchten Einzelprozesse nicht so wesentlich für das Fließen sind. Erst bei hohen Temperaturen (Born'sche Flüssigkeit) ist das System mehr und mehr durch die individuellen Bausteine bestimmt, bevor es ein Gas wird.

Metallene Volumengläser [8], aus denen z. B. die in Abb. 5 gezeigten Golfschläger hergestellt werden, zeigen eine sehr hohe Elastizitätsgrenze von $\gamma_c = 0.02$ bei gleichzeitig sehr hohem Schermodul (das

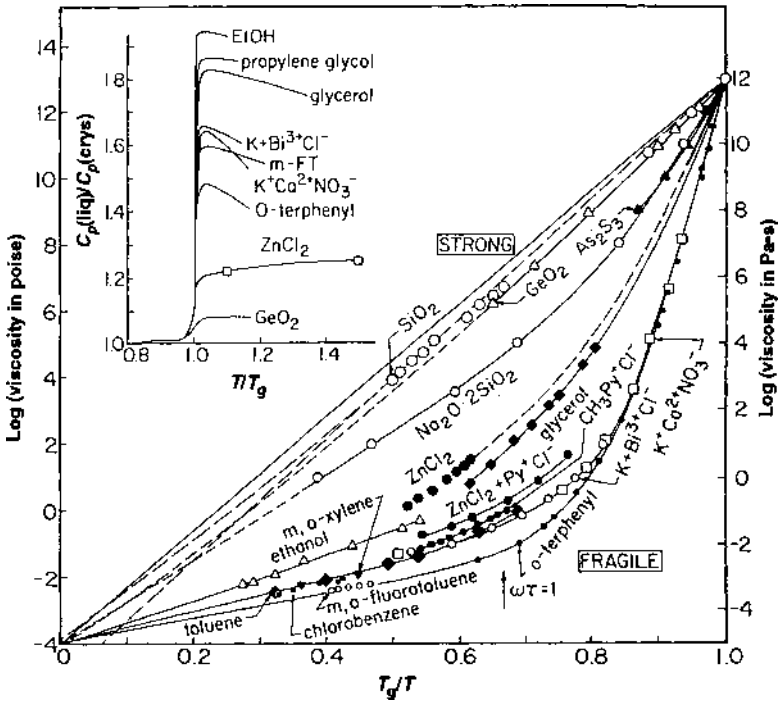


Abbildung 9: Logarithmische Auftragung der Viskosität einer Vielzahl von glasbildenden Systemen gegen T_g/T (T_g ist die Glastemperatur). Starke Gläser zeigen bei Erwärmung über T_g eine zunächst geringere Abnahme der Viskosität und Aufbrechen ihrer »eingefrorenen« Struktur als fragile Gläser. Dies ist eine Folge der höheren Potentialbarrieren, die starke Gläser für eine Änderung ihrer räumlichen Konfiguration zu überwinden haben [5].

Schermodul G gibt die Proportionalität zwischen Scherspannung τ und Scherdehnung γ an: $\tau = G\gamma$). Das führt zu extremen elastischen Energiedichten $E/V = 1/2\tau\gamma = 1/2G\gamma^2$ in diesem Material, welche in vielen Anwendungen, bei denen elastische Verformungen des Materials genutzt werden, ausgenutzt werden können. Leider besitzt das reine Glas einen nur kleinen plastischen Bereich, dem sich bei zunehmender Dehnung schnell ein Sprödbuch anschließt. Durch geeignete Zusätze und gezielte Präparation der Legierungen lässt sich jedoch ein Kompositmaterial aus Glasmatrix und eingebetteten kristallinen Dendriten herstellen (Abb. 12), dessen plastischer Bereich erheblich vergrößert ist, ohne dass die elastischen Eigenschaften verloren gehen. Auf diese

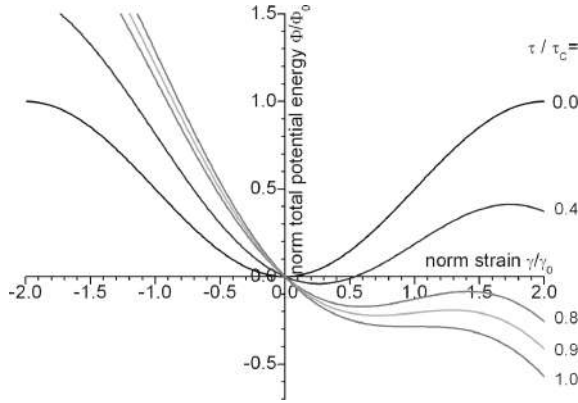


Abbildung 10: Schematische Repräsentation einer spannungs-induzierten Abnahme eines Energie-Maximums. Die Kurven entsprechen dem Verlauf der potentiellen Energie entlang einer relevanten Koordinate mit zunehmender elastischer Spannung bis das Minimum der potentiellen Energie verschwindet und das System in eine neue Konfiguration übergeht [7].

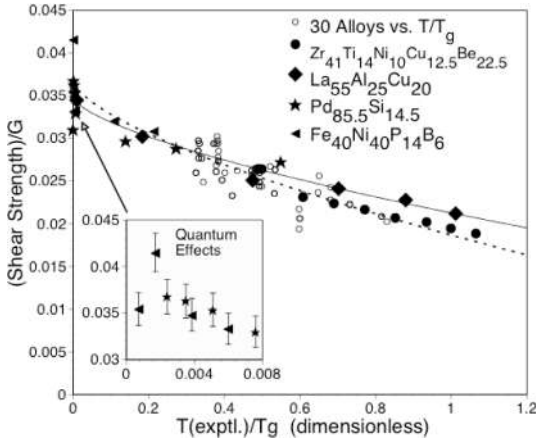


Abbildung 11: Experimentelle Bestimmung der kritischen Scherdehnung für die Verformung ($\tau Y/G$) als Funktion von $t = T/T_g$. Die kleinen offenen Kreise zeigen Raumtemperatur-Messwerte von 30 Legierungen mit unterschiedlichen Glask Temperaturen T_g . Gefüllte Kreise zeigen die Temperaturabhängigkeit von $\tau Y/G$ für Vitreloy 1 ($Zr_{41.2}Ti_{13.8}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$). Gefüllte Rauten, Sterne und Dreiecke zeigen Fließspannungen bis zu tiefen Temperaturen von $La_{55}Al_{25}Cu_{20}$ Volumenproben und schmelzgesponnenen $Pd_{85.5}Si_{14.5}$ und $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ ändern [7].

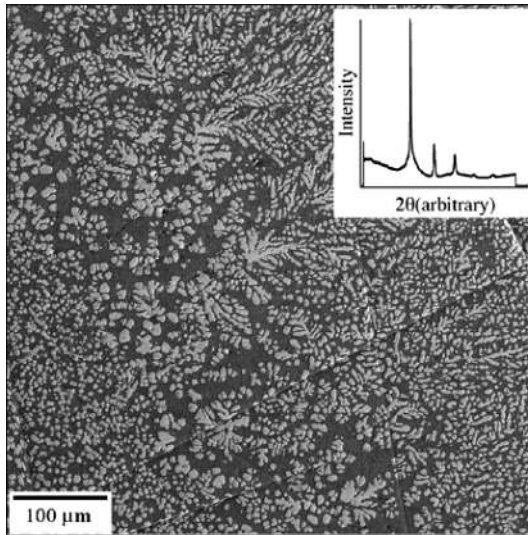


Abbildung 12: Im Rasterelektronenmikroskop: kristalline Dendriten, die beim Abkühlen im Glas wachsen [9].

Weise hat sich ein neuer glasartiger Funktionswerkstoff etabliert. Die Fortschritte in Verständnis des alten Werkstoffes Glas, der so vielfältig eingesetzt wird und lange unverstanden ist, gehen langsam aber hoffnungsvoll voran. Göttingen hat eine lange Tradition, nicht nur in der Physik, auf diesem Gebiet. Gemeinsam mit den Chemikern, Biologen und Geowissenschaftlern gibt es die »Göttinger Glastage«, ein Graduiertenkolleg und einen Sonderforschungsbereich der DFG, der sich u. a. dieser Frage widmet.

Literaturverzeichnis

- [1] <http://oldsite.vislab.usyd.edu.au/photonics/fibres/history/use1.html>
- [2] http://www-msd.lbl.gov/PIs/Tomsia/99/99_8_Tomsia_bone.html
- [3] M. Born, *J. Chem. Phys.* 1931, 7, 591
- [4] P. Debenedetti, »Metastable Liquids« (Princeton University Press, Princeton, 1996)
- [5] C. A. Angell, *Science* 1995, 267, 1924

- [6] aus dem SportScheck Katalog 1999
- [7] W. L. Johnson, K. Samwer *Phys. Rev. Lett.* 2005, 95 (19), 195501
- [8] S. Schneider, *J. Phys. – Condens. Matter* 2001, 13, 7723
- [9] Y. L. Huang, A. Bracchi, T. Niermann, M. Seibt, D. Danilov, B. Nestler, S. Schneider, *Scripta Mater.* 2005, 53, 93

Die Autoren

PAUL J. CRUTZEN, geb. 1939 in Amsterdam, hat zunächst eine nicht akademische Laufbahn in einem technischen Büro für Brückenbau in Amsterdam und für Hochbau in Gävle, Schweden, eingeschlagen.

1959 erhielt er eine Stelle im Institut für Meteorologie an der Universität von Stockholm. Hier fiel die Entscheidung für ein wissenschaftliches Studium. Paul Crutzen promovierte (PhD) (Filosofie Licentiat) 1968 und erhielt 1973 den Grad eines D.Sc. (Filosofie Doctor) an der Universität Stockholm. Seine wissenschaftlichen Forschungen führten ihn nach Oxford und Boulder, Colorado, USA.

1980 wurde Crutzen Mitglied der Max-Planck Gesellschaft und Direktor des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz. Crutzen ist Mitglied zahlreicher Gesellschaften und Stiftungen. Die Liste seiner Auszeichnungen ist überwältigend und wird gekrönt durch die Verleihung des Nobelpreises für Chemie im Jahre 1995.

MANFRED EIGEN, geb. 1927 in Bochum, studierte Physik und Chemie in Göttingen und promovierte 1951 in Physikalischer Chemie. Manfred Eigen wurde 1958 wissenschaftliches Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft und war von 1964 bis zu seiner Emeritierung 1997 Direktor am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen. Seit 1956 ist er mit zahlreichen wissenschaftlichen Preisen ausgezeichnet worden, im Jahr 1967 mit dem Nobelpreis für Chemie. Eigen erhielt zahlreiche Ehrendokortitel deutscher und ausländischer Universitäten, wurde mehrfach zum Präsidenten Wissenschaftsfördernder Organisationen gewählt und ist Mitglied der namhaftesten wissenschaftlichen Gesellschaften und Akademien weltweit.

PETER FROMHERZ, geb. 1942 in Ludwigshafen/Rhein, studierte Chemie an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Fromherz promovierte 1969 bei Hans Kuhn an der Universität Marburg und forschte von 1970 bis 1981 am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen in der Abteilung molekularer Systemaufbau.

1981 erhielt Peter Fromherz den Ruf auf den Lehrstuhl für Biophysik an die Universität Ulm. 1994 wurde er Direktor der Abteilung Membran- und Neurophysik am Max-Planck-Institut für Biochemie München und wurde zum Honorarprofessor an der Technischen Universität München ernannt.

Peter Fromherz ist Mitglied mehrerer Akademien. Er ist Preisträger des 1998 erstmalig verliehenen Julius-Springer-Preises für Angewandte Physik und wurde 2004 mit dem Philipp-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.

WALTER J. GEHRING, geb. 1939 in Zürich, studierte Zoologie an der Universität Zürich. Nach der Promotion (1965) wechselte er 1967 als Postdoctoral fellow an die Universität Yale, New Haven, Connecticut, USA. Von 1969 bis 1972 war er Associate Professor in Yale und wurde 1972 an das Biozentrum der Universität Basel berufen, wo er bis heute die Abteilung Zellbiologie leitet.

Walter Gehring hat seine Forschungen seit seiner Promotion mit dem Modellorganismus *Drosophila* gemacht. Die genetische Kontrolle von Genen bei der Evolution und der Morphogenese der Augen sind die Themen seiner erfolgreichen Arbeit, für die er mit den höchsten wissenschaftlichen Preisen ausgezeichnet wurde. Walter Gehring ist Mitglied zahlreicher internationaler Akademien und seit 1994 Mitglied des Ordens *pour le mérite*.

Sein Lebenswerk wurde 2000 mit dem Kyoto Prize der Inamari Foundation geehrt.

EVA-MARIA NEHER, geb. 1950 in Mülheim an der Ruhr, studierte Mikrobiologie und Biochemie an der Universität Göttingen. Sie legte das Diplom 1974 ab und promovierte 1977 bei Hans G. Schlegel mit einer Arbeit über die intrazelluläre Regulation eines Enzyms in Wasserstoffbakterien. Neher erhielt ein post-doc Stipendium am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie und wechselte danach an die Medizinische Fakultät der Universität Göttingen. Nach einer mehrjährigen Familienpause erteilte Neher an der Freien Waldorfschule Göttingen Experimentalunterricht in Biologie und Chemie. Von 1998 bis 2000 entwickelte sie das wissenschaftlich-didaktische Konzept zur EXPO Ausstellung »Faszination Pflanzenzüchtung« und verfolgte die Gründung des XLAB, dessen Leitung und Geschäftsführung sie seit 2000 innehat.

KONRAD SAMWER, geb. 1952 in Göttingen, studierte Physik in Göttingen und Bonn. 1981 promovierte er zum Thema »Thermische und elektrische Eigenschaften des metallischen Glases ZrCu«. Nach der Habilitation erhielt er eine Professur für Experimentalphysik an der Universität Augsburg (1989) und arbeitete wiederholt als Gastwissenschaftler am California Institute of Technology, Los Angeles, USA.

Konrad Samwer folgte 1999 dem Ruf nach Göttingen, wo er bis heute lehrt und forscht. Im Jahre 2004 wurde er für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Metallphysik mit dem Leibniz Preis der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgezeichnet.

SUSANNE SCHNEIDER, geb. 1961 in Bonn, studierte Physik an der Universität Göttingen und legte 1988 das Diplom in Physik ab und promovierte 1992. Von 1993 bis 1995 führte sie ein Forschungsaufenthalt an das California Institute of Technology, Pasadena, USA. 2001 habilitierte Susanne Schneider sich mit Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Festkörperphysik und wechselte 2002 vom I. Physikalischen Institut zum IV. Physikalischen Institut. Dort ist sie u. a. für die fachwissenschaftliche und didaktische Ausbildung von Lehramtsanwärtern im Fach Physik zuständig. Im April 2006 wurde Susanne Schneider zur außerplanmäßigen Professorin für Physik an der Universität Göttingen ernannt.

WOLF SINGER, geb. 1943 in München, studierte Medizin in München und Paris. Nach der Promotion 1968 und der Approbation zum Allgemeinmediziner ging Wolf Singer 1970 an die Universität von Sussex.

Von 1972 bis 1982 arbeitete er am Max-Planck-Institut für Psychiatrie, München, in den Abteilungen Otto Creutzfeld und Hans Dieter Lux und habilitierte 1975 an der Technischen Universität München.

1982 wurde Wolf Singer Direktor am Max-Planck Institut für Hirnforschung in Frankfurt und wurde 2004 Gründungsdirektor des Frankfurt Institute of Advanced Studies (FIAS).

Er zählt durch zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen, Bücher, Interviews, populärwissenschaftliche Aufsätze und Vorträge zu den bekanntesten Hirnforschern unserer Zeit. Seine wissenschaftliche Arbeit wurde national und international durch zahlreiche Preise ausgezeichnet.

MARK WALKER, geb. 1959 in Savanna, Illinois, USA, studierte Mathematik und Geschichte an den Universitäten Washington und Princeton, USA. Mark Walker ist seit 1987 Full Professor am Department of History am Union College, Schenectady, NY, USA.

Das Forschungsinteresse Mark Walkers konzentriert sich auf die Geschichte der Naturwissenschaften zur Zeit des Nationalsozialismus. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten führten ihn zahlreiche Gastprofessuren und Forschungsaufenthalte nach Deutschland. Walker machte seine historischen Forschungen im Auftrag der Max-Planck-Gesellschaft, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Walkers Aufsätze sind in zahlreichen Büchern und Zeitschriften in deutscher Sprache veröffentlicht und auch ins Spanische und Polnische übersetzt worden.

ANTON ZEILINGER, geb. 1945 in Ried/Innkreis, Österreich, studierte und promovierte (1971) an der Universität Wien und habilitierte 1979 an der Technischen Universität Wien.

Von 1974 bis 1989 führten ihn viele Forschungsaufenthalte ins Ausland, z.B. nach Grenoble, Frankreich, an das Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA, University of Melbourne, Australien, das Hampshire College, Amherst, USA, und die Technische Universität München. Seit 1990 ist Anton Zeilinger Universitätsprofessor für Experimental Physik an der Universität Wien. Gastprofessuren führten ihn u. a. an das Collège de France, Paris, und an die Universität Oxford, England. Anton Zeilinger wurde seit Beginn seiner wissenschaftlichen Karriere durch zahlreiche Preise ausgezeichnet, er ist Träger des österreichischen Ehrenzeichens und Mitglied des Ordens Pour le mérite.

Anton Zeilinger hat eine breite Öffentlichkeit durch seine Bücher und populären Aufsätze in die Quantenphysik eingeführt.