Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 99 (1981)
Heft: 42: SIA, Heft 5

Artikel: Perspektiven und Schranken der Naturwissenschaft
Autor: Weisskopf, Viktor F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74570

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Perspektiven und Schranken der Naturwissenschaft

Von Viktor F. Weisskopf, Cambridge (Mass.)

Der folgende Beitrag ist ein Vorabdruck aus dem Sammelband «Rückblick in die Zukunft. Beiträge zur Lage von Wirtschaft und Wissenschaft, Kultur und Kunst», in dem sich namhafte Autoren zur Lage der achtziger Jahre äussern. Das Buch erscheint im Oktober bei Severin und Siedler in Berlin. Der Autor des Essays, 1908 in Wien geboren, ist Professor für theoretische Physik am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (Mass.). Von 1961 bis 1965 war Weisskopf erster Generaldirektor bei der Europäischen Organisation für Kernforschung (Cern) in Genf.

Was ist Wissenschaft?

Seit den Anfängen der Kultur hat der Mensch die Welt, in der er lebt, erkennen wollen; ständig hat er nach Erklärungen für seine eigene Existenz und für die Existenz der Welt gesucht – wie sie erschaffen wurde, wie sie sich entwickelte, wie sie das Leben und die Menschheit hervorbrachte und wie sie eines Tages enden wird. Die ersten Vorstellungen darüber wurden in einem mythologischen, religiösen oder philosophischen Rahmen entwickelt. Sie haben alle eines gemeinsam: Sie richten sich auf die *Gesamtheit der Phänomene;* sie möchten *alles Seiende erklären.* Sie möchten die *absolute Wahrheit* bieten, indem sie fundamentale Fragen des Daseins wie: Warum ist die Welt so, wie wir sie vorfinden? Was ist Leben? Was ist der Anfang und das Ende des Universums? unmittelbar zu beantworten versuchen.

Vor einigen hundert Jahren schlug der Erkenntnisdrang der Menschen einen anderen Weg ein: Statt nach der umfassenden Wahrheit zu streben, begannen die Menschen, *eindeutig definierbare und unterscheidbare Phänomene* zu untersuchen. Sie fragten nicht mehr: Was ist Materie? Was ist Leben?, sondern vielmehr: Wie fliesst das Blut in den Blutgefässen?, nicht mehr: Wie wurde die Welt erschaffen?, sondern vielmehr: Wie bewegen sich die Planeten am Himmel? Man mied, anders gesagt, allgemeine Fragen und stellte statt dessen *begrenzte Fragen,* auf die man eher eine direkte und unzweideutige Antwort zu erhalten hoffte.

Es geschah etwas Unerwartetes. Die *Beschränkung* wurde damit belohnt, dass man auf die begrenzten Fragen immer allgemeinere Antworten erhielt. Dank dem Verzicht auf unmittelbare Erlangung der absoluten Wahrheit, dank dem Umweg über die Mannigfaltigkeit der Erfahrung konnte die Wissenschaft durchschlagendere Methoden und fundamentalere Erkenntnisse entwickeln. Die Untersuchung sich bewegender Körper führte zur *Himmelsmechanik* und zur Einsicht in die *Allgemeingültigkeit des Gravitationsgesetzes.* Die Untersuchung von Reibungserscheinungen und Gasen führte zu den allgemeinen Gesetzen der *Thermodynamik.* Die Untersuchung der Bewegungen von Froschmuskeln und von galvanischen Elementen führte zu den Gesetzen der *Elektrizität,* in denen man die Basis der Struktur der Materie erkannte. Durch dieses detaillierte Fragen wurde der Rahmen für ein Verständnis der natürlichen Welt geschaffen. Auf diese Weise entstand im 20. Jahrhundert so etwas wie ein wissenschaftliches Weltbild, eine Synthese der in den letzten fünfhundert Jahren gewonnenen wissenschaftlichen Einsichten.

Das Weltbild der Naturwissenschaft unterscheidet sich in zwei wichtigen Aspekten vom religiösen, mythologischen und philosophischen Weltbild. Erstens enthält es nicht unmittelbare Begriffe, die mit der «menschlichen Seele», etwa mit Ehrfurcht, Trostlosigkeit, Glück, Recht oder Unrecht usw. zu tun haben. Es enthält diese Begriffe jedoch mittelbar als Manifestation bestimmter neurophysiologischer Denkprozesse. Wir werden darauf später zurückkommen.

Zweitens sind die Erkenntnisse *«vorläufig»,* sie werden als unvollständige Wahrnehmungen betrachtet, als Teile einer grösseren Wahrheit, die in der Vielfältigkeit der Phänomene verborgen ist. Die Einsichten beruhen nicht auf dogmatischen Prinzipien, die uns durch göttliche Inspiration offenbart werden, oder auf einer in uns aufblitzenden, vollkommenen Erkenntnis. Was wir als «die Wahrheit» auffassen, wird immer nur in *Teilschritten* enthüllt, die zuweilen grosse, zuweilen kleine und manchmal sogar Rückschritte sind.

Ich will versuchen, das heutige wissenschaftliche Weltbild «al fresco» zu beschreiben. Sein Ausgangspunkt war natürlich die Vereinigung der Himmels- und der irdischen Mechanik durch *Kopernikus, Tycho Brahe, Kepler, Galilei* und *Newton.* Doch die Einsichten in den Aufbau der Materie beruhen auf drei bedeutenden Entdeckungen des 19. Jahrhunderts:

1. All die ungeheuer verschiedenen Formen der Materie im gesamten Universum bestehen aus nur 92 Kerngattungen.

2. Wärme ist nichts anderes als die ungeordnete Bewegung von Atomen und ihrer Verbindungen.

3. Elektrische, magnetische und optische Phänomene sind Manifestationen einer und derselben Entität, des elektromagnetischen Feldes, das durch elektrisch geladene Teilchen erzeugt wird; dieses Feld breitet sich in Gestalt von Lichtwellen unabhängig im Raum aus. Die Einführung des Begriffs des *Feldes,* das sich in Lichtwellen manifestiert, war eine der bedeutendsten Erkenntnisse des Jahrhunderts.

Doch erst im 20. Jahrhundert wurden die fundamentalen Entdeckungen gemacht, die eine kohärente Grundlage für ein umfassendes Weltbild lieferten. Wiederum lassen sich drei Schritte unterscheiden:

Die Relativitätstheorie

Sie beruht auf der Erkenntnis der *fundamentalen Einheit von Zeit und Raum,* die eine universale Grenze der Geschwindigkeit – der *Lichtgeschwindigkeit* – einschliesst. Daraus folgte die *Äquivalenz von Masse und Energie* und die Erkenntnis, dass *Schwere eine Wirkung der Krümmung des Raumes* ist. Die Theorie lieferte ausserdem den begrifflichen Rahmen für die beobachtete Ausdehnung des Weltalls, ausgehend von einem singulären Anfangszustand von unendlicher Verdichtung und Energie. Es muss betont werden, dass

das Wort «Relativität» eine irreführende Bezeichnung ist. Die Theorie besagt, dass die Naturgesetze unabhängig von irgendeinem spezifischen Bezugsrahmen auf eine absolute Weise formuliert werden können und sollten.

Das Quant

Man fand heraus, dass die *Mechanik von Systemen atomarer Grössenordnung auf Gesetzen beruht, die von jenen abweichen, die das Verhalten makroskopischer Objekte zu beherrschen scheinen.* Ein grundlegendes Merkmal der atomaren Welt ist die Existenz von bestimmten Strukturen (der 92 Kerngattungen), die unter vergleichbaren Bedingungen in Form und Qualität stets absolut identisch zu sein scheinen. Eisenatome oder Sauerstoffatome sind exakt dieselben, gleichgültig, ob man sie hier oder dort auf der Erde oder – wie wir mit gutem Grund annehmen können – irgendwo im Universum findet. Die Vorstellungen, die man sich vor der Einführung der Quantenmechanik von der Materie machte, liessen eine solche Identität nicht zu. Für die «Vor-Quanten»-Physik konnten zwei Objekte nicht in jeder Hinsicht identisch sein, da für die vollständige Beschreibung eines Objekts grundsätzlich eine unendliche Menge von Indikatoren erforderlich war. Die Beschreibung konnte immer in einem ganz geringfügigen Detail abweichen. Es bedurfte daher eines neuen begrifflichen Rahmens, innerhalb dessen der Zustand eines Systems in all seinen Merkmalen vollständig durch eine endliche Menge von Indikatoren definiert werden konnte. Diesen neuen Rahmen lieferte die *Quantenmechanik,* deren Leitbegriff der «Quantenzustand» ist; die Indikatoren sind die «Quantenzahlen».

Eine solche Situation ist mit der «klassischen» Art, ein Objekt zu beschreiben, nicht zu vereinbaren. Die früheren Beschreibungsweisen können daher keine volle Geltung mehr besitzen. Das ist der Inhalt der sogenannten *Unbestimmtheitsrelationen.* Der Ausdruck «Unbestimmtheit» bezieht sich auf die Anwendbarkeit der vor Einführung der Quantenmechanik gültigen Begriffe. Eigentlich müsste es «Bestimmtheits»-relationen heissen, denn sie sind die Voraussetzung für die Existenz eines eindeutig bestimmten Zustands, der durch eine endliche Zahl von Parametern definiert ist. Beispielsweise ist der Zustand geringster Energie von acht Elektronen, die sich um einen Mittelpunkt (den Kern) mit acht positiven Ladungseinheiten bewegen, in eindeutiger Weise bestimmt; es ist der Grundzustand von Sauerstoff. Im gleichen Sinne sind die spezifischen Merkmale der 92 Atomarten als Eigenschaften und Symmetrien des niedrigsten Quantenzustands eines Systems von Elektronen zu verstehen, die durch elektrische Kräfte an einen Kern gebunden sind, der eine der Zahl der Elektronen entsprechende Ladung trägt. Alles, was man für die Bestimmung der Quantenzustände und ihrer Quantenzahlen wissen muss, ist die Zahl der Elektronen. Quantität bestimmt Qualität.

Der Quantenzustand niedrigster Energie enthüllt zwar die meisten Eigenschaften der Atome, doch hängt ihre Dynamik, ihr Wechselspiel mit dem Licht und mit anderen Atomen weitgehend von den anderen Quantenzuständen höherer Energie ab. Der Energieunterschied zwischen dem Grundzustand und dem nächsthöheren Quantenzustand ist von grosser Bedeutung. Wir sprechen von ihm als der *Schwellenenergie.* Er sorgt dafür, dass die Atome trotz der unvermeidlichen Störungen aus der Umwelt ihre Identität behalten. Die Atome bleiben in ihrem Grundzustand, solange die Energie dieser Störungen unterhalb der Schwelle liegt. Ist das nicht mehr der Fall, dann werden die Atome zu höheren Quantenzuständen angeregt, und sie verlieren ihre Identität.

Die Schwellenenergie von Atomen beträgt einige Elektronenvolt. Das ist weit mehr als die Energie der Störungen, die ein Atom in einer Umwelt bei irdischen Temperaturen erleidet. Von einer Flamme oder einer elektrischen Entladung kann sie jedoch übertroffen werden. Tatsächlich ist das von einem Blitz ausgesandte Licht eine Wirkung von Sauerstoff-(und Stickstoff-)Atomen, die aus «angeregten» Quantenzuständen zurückfallen.

Zu den bedeutendsten Eigenschaften der Atome gehören ihre *Wechselwirkungen* mit anderen Atomen. Sie sind für die Bildung von Molekülen, Festkörpern und Flüssigkeiten verantwortlich. Insbesondere stellte sich heraus, dass die wunderbaren Eigenschaften des *Kohlenstoffatoms* auf die spezifische Symmetrie seines Quantenzustands zurückgehen, auf seine viereckige, tetraederartige Gestalt. Wir erkennen hier die Macht der *Symmetrie,* die sich in der Fähigkeit dieses Atoms äussert, sich nicht nur in der härtesten und dichtesten Form von Materie (Diamant) zu vereinigen, sondern sich ausserdem mit so vielen anderen Atomen zu den unzähligen Spielarten von Molekülketten zu verbinden, welche die Grundlage der Lebenserscheinungen bilden.

Die Quantenleiter

Der dritte Schritt bei der Entwicklung des Weltbildes im 20. Jahrhundert war die Erkenntnis einer *strukturellen Hierarchie in der Natur.* Sie geht auf eine typische Konsequenz aus der Quantenmechanik zurück: die *Beziehung zwischen Grösse und Energie.* Sie besagt, etwas vereinfacht ausgedrückt: Je kleiner das System, um so höher die Schwellenenergie vom niedrigsten Quantenzustand zum nächsthöheren. Wenn wir beispielsweise den inneren Quantenzustand eines Atomkerns verändern möchten, müssen wir sehr viel höhere Energien anwenden, als sie für eine Veränderung der Zustände des Atoms nötig wären. Tatsächlich wurden die höheren Quantenzustände von Kernen sichtbar, nachdem man Zyklotrone und andere Beschleuniger erfunden hatte, die Millionen von Elektronenvolt liefern konnten. Ein neuer Phänomenbereich wurde enthüllt: die nukleare Dynamik mit ihren spezifischen Erscheinungen der *Radioaktivität,* der *Spaltung,* der *Fusion* usw. kam in Gang – ein Bereich, der in einer Umgebung, die wie die irdische nicht die erforderlichen Energien bereitstellen kann, *inaktiv* bleibt. *Aktiv* ist er dagegen im Zentrum der Sterne, wo die Temperatur hoch genug ist, um Kernreaktionen, welche die für die Strahlung der Sterne nötige Energie liefern, in Gang zu setzen. Die Quantenmechanik ist gleichfalls das Leitprinzip der *nuklearen Dynamik.* Doch tritt hier eine neue Naturkraft auf: die *Kernkraft;* sie ist es, die Protonen und Neutronen innerhalb des Kerns zusammenhält.

Natürlich entstand die Frage, ob die Protonen und Neutronen ihrerseits eine innere Struktur haben. In diesem Falle würden wegen der geringeren Grösse dieser Entitäten noch höhere Energien als bei der Dynamik der Kerne erforderlich sein, um diese innere Dynamik auszulösen. Tatsächlich wurde nach dem Bau von Beschleunigern, die Milliarden von Elektronenvolt bereitstellen, ein weiterer Phänomenbereich entdeckt: die nächsthöhere Sprosse der Quantenleiter. Die innere Dynamik der Protonen und Neutronen äussert sich in neuen Formen von Radioaktivität, neuen Typen kurzlebiger Teilchen (den Mesonen) und einer reichlichen Erzeugung und Vernichtung von Antimaterie. Bausteine des Protons und des Neutrons scheinen die *«Quarks»* zu sein, die durch eine neue Art von Kraft mit dem wenig inspirierenden Namen «starke Kraft» zusammengehalten werden. Die schon erwähnte Kernkraft zwischen Neutronen und Protonen mag sich sogar als eine Folge dieser «starken Kräfte» herausstellen.

Die Dynamik dieses Bereichs ist wegen der hohen Energieschwelle sogar im Innern gewöhnlicher Sterne inaktiv. Nach aller Wahrscheinlichkeit könnte

sie in einigen ungewöhnlich heissen Sternen und während der ersten Momente des Urknalls eine Rolle spielen.

Wir wissen nicht, ob dies die letzte Sprosse der Quantenleiter ist; es mag höhere Sprossen geben. Die Quarks, von denen wir bereits fünf verschiedene Typen kennen, mögen zusammengesetzte Systeme mit einer noch höheren Schwelle sein; es mag innerhalb des Elektrons eine innere Dynamik geben, die im Rahmen der bislang verfügbaren Energien inaktiv bleibt.

Das Universum

Während dieses Jahrhunderts hat eine Reihe von Entdeckungen unsere Einsichten in die Natur des gesamten Universums erweitert. Dazu zählt die Entdeckung einer *stetigen Ausdehnung der gesamten Welt;* man gelangte aufgrund dieser Tatsache zu dem Schluss, dass es einen Anfang gegeben haben muss, in dem die Materie über den gesamten Raum extrem heiss und verdichtet war. Die wohl unheimlichste Entdeckung bestand in der Beobachtung einer *schwachen Strahlung,* die anscheinend den ganzen Raum ausfüllt. Sie hat alle Eigenschaften, die man von einem optischen Echo des Urknalls erwarten würde, einem Echo, das noch immer durch den Raum nachhallt.

Weitere Entdeckungen in diesem Bereich waren die *«Neuronensterne»,* die *«Quasare»* und die *«Schwarzen Löcher»;* das alles sind Agglomerationen von Materie ganz anderer Art, als wir sie im Sonnensystem kennen, aber vielleicht Manifestationen von Materie, die sich auf der Grundlage unseres derzeitigen Wissens von materiellen Eigenschaften verstehen lassen.

Die zwei Grenzbereiche der Wissenschaft

Die physikalische Wissenschaft entwikkelte sich an zwei Fronten. Eine möchte ich als den *inneren* Grenzbereich bezeichnen. Es geht dabei um die Erforschung der *Konsequenzen der Wechselwirkungen zwischen Atomen.* Zwar ist das Wesen dieser Wechselwirkungen im Prinzip bekannt, doch sind ihre Konsequenzen so mannigfaltig und komplex, dass ein seit den Anfängen der Quantenmechanik sich ständig erweiternder *Grenzbereich der Forschung* sich mit ihnen befasst. Die Phänomene reichen von wohlbekannten Eigenschaften von Kristallen, Metallen, Flüssigkeiten und Gasen bis zu neuen Erscheinungen, die nur unter speziellen Bedingungen auftreten, wie etwa die *Supraleitung von Metallen* und die *Suprafluidität von Flüssigkeiten bei sehr niedrigen Temperaturen,* die Existenz von *Flüssigkristallen* und die bei sehr hohen Temperaturen beziehungsweise sehr niedrigen Drücken auftretenden Erscheinungen eines besonderen Aggregatzustandes, den wir *«Plasma»* nennen. Die *Laser-Physik* und die *Physik der Oberflächenfilme* gehören ebenfalls in diesen Bereich. In diesem Grenzbereich, der den grössten Teil der modernen Physik und Chemie umfasst, werden immer mehr Phänomene und materielle Eigenschaften entdeckt, erklärt und benutzt.

Heute sollte sogar ein grosser Teil der *Biologie* diesem Bereich zugerechnet werden, namentlich die *Molekularbiologie. Darwin* verdanken wir die vierte grosse Einsicht in das Wirken der Natur, zu der es im 19. Jahrhundert kam; er erklärte, wie das Prinzip der *Zielgerichtetheit,* der Finalität, in eine Welt Einzug hielt, die von Gesetzen beherrscht wird, die dieses Prinzip nicht kennen.

Im Prinzip beruhen sämtliche Phänomene, die auf die Wechselwirkung von Atomen und Molekülen zurückgehen, auf der *Quantenmechanik von Elektronenbewegungen unter dem Einfluss elektrischer Kräfte.* Wir haben keinen Grund, daran zu zweifeln. Aber nur im Prinzip! Um mit der ungeheuren Vielfalt dieser Phänomene fertigzuwerden, mussten auf Schritt und Tritt spezielle Begriffe wie Temperatur, Entropie, chemische Bindung, Viskosität, Gel und viele andere eingeführt werden. Insbesondere wenn wir uns der belebten Welt nähern, sind die Begriffe und Beschreibungsweisen sehr weit von den grundlegenden elektrischen Anziehungen und Abstossungen zwischen Elektronen und Kernen entfernt.

Es gibt einen guten Grund für die *Komplexität der atomaren Welt.* Der Atomaufbau, so wie wir ihn heute verstehen, gestattet eine ungeheure Vielfalt von *Kombinationen und Rekombinationen von Atomen,* die *spezifische Strukturen* und aufeinander aufbauende *Superstrukturen* bilden. Die Fähigkeit, sich zu bestimmten Strukturen zu verbinden, beruht auf dem «morphischen» Charakter der Elektronenwellen, der spezifische und typische Kombinationen und Verknüpfungen von atomaren Einheiten zulässt.

Es gibt jedoch weitere Gründe, warum der atomare Bereich für die Bildung komplexer Strukturen und Superstrukturen besonders geeignet ist. Sie hängen zusammen mit der Existenz von zwei verschiedenen Typen von Grundbausteinen – den *Elektronen* und den *Kernen.* Diese haben entgegengesetzte elektrische Ladungen; Atome sind daher elektrisch neutral und können sich in beliebiger Zahl verbinden, ohne dass elektrische Abstossung sie auseinandertreibt. Ausserdem sind die Kerne massiv, die Elektronen dagegen leicht; die Tatsache, dass sie sehr verschiedene Massen haben, macht es möglich, dass die Kerne in Molekülen oder anderen atomaren Gebilden wohldefinierte Stellen einnehmen, während die Elektronen über die Zwischenräume verteilt sind und die Wellenstrukturen bilden, welche die Kerne an ihrem Ort festhalten. Das mehr oder weniger feste Skelett der Kerne innerhalb der Moleküle lässt das entstehen, was man als *«molekulare Architektur»* bezeichnen könnte. Es bewirkt typische und spezifische räumliche Anordnungen von Atomen und Molekülen, bespielsweise den charakteristischen *Helix-Aufbau des DNS-Moleküls,* der «Spirale des Lebens».

Wenn man die Komplexität von atomaren und molekularen Agglomerationen verstehen will, bedarf es anderer Betrachtungsweisen und Begriffssysteme als bei den zugrunde liegenden fundamentalen Prinzipien. In der letzten Zeit ist in der Entwicklung solcher Begriffssysteme, die sich für kooperative Erscheinungen, bei denen eine grosse Zahl von Molekülen wechselwirkt, eignen, ein gewisser Fortschritt erzielt worden. Erstaunlicherweise wurden diese Methoden und Begriffe ursprünglich zur Lösung ganz anderer Probleme benutzt, etwa von Problemen, die in der Theorie der Wechselwirkungen von Teilchen und Feldern auftreten. Es hat sich herausgestellt, dass sie nach entsprechender Anpassung für die Behandlung von kooperativen Phänomenen überaus brauchbar sind. Umgekehrt waren Begriffe von kooperativen Phänomenen nützlich für die Lösung von Problemen in der Physik der Elementarteilchen. Der menschliche Geist lernt bei jeder geeigneten Gelegenheit, sich an neue komplexe Situationen anzupassen.

Wir müssen noch vieles lernen, um die komplexen und verwickelten Phänomene in der Welt der Atome, Moleküle, Molekülketten und Lebewesen wirklich zu verstehen. Wirkliches Verstehen heisst, zwischen dem Wesentlichen und dem Unwesentlichen zu unterscheiden. Erst wenn wir zu einem solchen Verstehen gelangen, wenn wir imstande sein werden, das Relevante vom Irrelevanten zu trennen, werden die Phänomene für uns nicht mehr komplex, sondern transparent sein.

Wir kommen nun zum zweiten Grenzbereich der Naturwissenschaft, den ich den *äusseren* Grenzbereich nenne. Hier geht es um die *höheren Sprossen der Quantenleiter,* um jene Phänomenbereiche, deren fundamentale Prinzipien wir noch nicht hinreichend verstehen.

Während wir mit Sicherheit wissen, dass der atomare Bereich auf den wohlbekannten elektrischen Kräften zwischen den Bausteinen beruht, sind die *Kräfte zwischen Protonen und Neutronen,* die *Kräfte zwischen den Quarks* und die *Kräfte, die den radioaktiven Zerfall* regeln, noch nicht befriedigend geklärt.

Im äusseren Grenzbereich gibt es zwei Fronten; an der einen geht es um ein *besseres Verstehen dieser neuen Kräfte,* an der anderen um die *Analyse der vielen unerwarteten Phänomene,* Teilchen und Prozesse, die auftauchen, wenn die höheren Bereiche der Quantenleiter durch *Hochenergie-Beschleuniger* aktiviert werden oder wenn wir sie mit starken *Teleskopen* irgendwo in der Tiefe des Weltalls beobachten. Im äusseren Grenzbereich werden also zwei Ziele verfolgt: Einmal geht es darum, zuvor unbekannte Naturphänomene zu beobachten und zu analysieren, zum anderen darum, mehr über die Grundprinzipien zu erfahren, die auf diesen höheren Sprossen gelten. Auf dem ersten Wege gelangen wir zu Erkenntnissen über *neuartige Verhaltensweisen der Materie,* die in grösserer Mannigfaltigkeit aufzutreten scheinen, als wir je erwartet hatten. Auf dem zweiten Wege gelangen wir nicht nur zu Erklärungen für diese neuen Phänomene, sondern auch zu einem gründlicheren Verständnis dessen, was in unserer eigenen Umwelt vor sich geht. Vielleicht werden wir die tieferen Gründe erfassen, warum es Protonen, Neutronen und Elektronen gibt und warum sie jene Eigenschaften haben, die letztlich die Natur der atomaren Welt, in der wir leben, bestimmen.

In den letzten Jahrzehnten ist im äusseren Grenzbereich eine reiche Ernte eingebracht worden. Dazu zählt die Entdeckung der Mehrzahl der oben erwähnten Phänomene auf der höchsten Sprosse der Quantenleiter durch Experimentalphysiker; manche dieser Untersuchungen sind ans Wunderbare grenzende Grosstaten experimenteller Geschicklichkeit und Erfindungskraft. Auch kamen wir dadurch dem Wesen der die Prozesse beherrschenden Kräfte näher. Dieses Verständnis hat in den letzten zehn Jahren so rasche Fortschritte gemacht, dass wir heute eine Art von Euphorie unter den theoretischen Physikern beobachten, die glauben, sie seien auf dem Wege dahin, letztlich alle Kräfte der Natur als Manifestationen eines einzigen Prinzips zu verstehen. Das kommende Jahrzehnt wird zeigen, ob diese Euphorie gerechtfertigt war.

Der Leitgedanke geht auf eine Analyse der am besten bekannten Kräfte zurück, der *Schwerkraft* und der *elektrischen Kraft.* Man wusste seit geraumer Zeit, dass sie als eine notwendige *Konsequenz einer verborgenen Symmetrie der Natur* betrachtet werden können. Symmetrie bedeutet, dass die Naturgesetze bei der Durchführung bestimmter Transformationen unverändert bleiben. So nimmt man etwa an, die Gesetze seien unabhängig von der Zeit; man nimmt an, dass sie sich nicht verändern, wenn ein Ereignis, das beispielsweise eine Million Jahre zurückliegt, zeitlich auf heute verschoben wird. Für räumliche Verschiebungen gilt dasselbe. Es gibt darüber hinaus Symmetrien abstrakterer Art. So erzeugt der in die Quantenmechanik eingeführte Begriff der vollständigen Identität eine weitere Symmetrie, die darauf beruht, dass beim Austausch zweier identischer Teilchen die Naturgesetze unberührt bleiben. Es lässt sich zeigen, dass jede dieser Symmetrien bestimmte Konsequenzen hat. Aus der zeitlichen Symmetrie folgt die Erhaltung der Energie, aus der räumlichen Symmetrie die Erhaltung des Impulses. Andere Symmetrien haben verwickeltere Konsequenzen; so folgt aus der Symmetrie des Teilchenaustausch die Starrheit der Atome und folglich die Härte fester Materie.

Wie kann eine Symmetrie eine Kraft erzeugen? Das ist nicht einfach zu erklären, aber ich kann eine Vorstellung vermitteln, indem ich zeige, wie die Schwerkraft mit der Symmetrie von Zeit und Raum zusammenhängt. Wir wollen versuchen, die Naturgesetze so zu formulieren, dass sie unabhängig davon sind, ob wir sie in einem sich stetig bewegenden Rahmen beobachten oder in einem Rahmen, dessen Bewegung sich beschleunigt (wie bei einem sich beschleunigenden Auto). Wir sind genötigt, eine Kraft in die Gesetze einzubeziehen, wenn wir den Rückwärtsschub der Objekte innerhalb des sich beschleunigenden Rahmens beschreiben wollen. Dieser Schub ist der Wirkung einer Schwerkraft nicht unähnlich. Diese Überlegung trägt vielleicht zu der Einsicht bei, dass aus einer postulierten Unabhängigkeit oder Symmetrie der Naturgesetze eine Kraft hervorgeht.

Die Symmetrie, welche die elektromagnetischen Kräfte erzeugt, ist verwickelter. Sie beruht auf der Wellennatur der Teilchen und auf der Unabhängigkeit der Naturgesetze von der Schwingungsphase der Teilchenwellen.

Kräfte, die aus einer postulierten Symmetrie hervorgehen, werden *«Eichkräfte»* genannt; sie besitzen einige charakteristische Eigenschaften, die bei den Kräften in der Natur tatsächlich auftreten. So müssen Kraftfelder auf Quellen zurückgehen, die im Falle der Schwerkraft in massiven Körpern, im Falle der Elektrizität in geladenen Teilchen bestehen; diese Felder breiten sich im ersten Falle als *Gravitonen,* im letzten als *Photonen* mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus.

Im letzten Jahrhundert konnten theoretische Physiker zeigen, dass *alle vier fundamentalen Naturkräfte als Eichkräfte aufgefasst* werden können. Damit wird es möglich, sie alle in einem *einheitlichen System* zu beschreiben. Von diesem ehrgeizigen Ziel sind wir jedoch noch weit entfernt. Ausserdem scheint diese Methode keine Erklärung für die unterschiedlichen Massen der beobachteten Teilchen zu bieten, was namentlich für die Massendifferenz zwischen Elektron und Proton gilt – eine Differenz, die, wie schon gesagt, für das Verständnis der uns umgebenden Welt wesentlich ist.

Die historische Behandlung der hierarchischen Strukturen

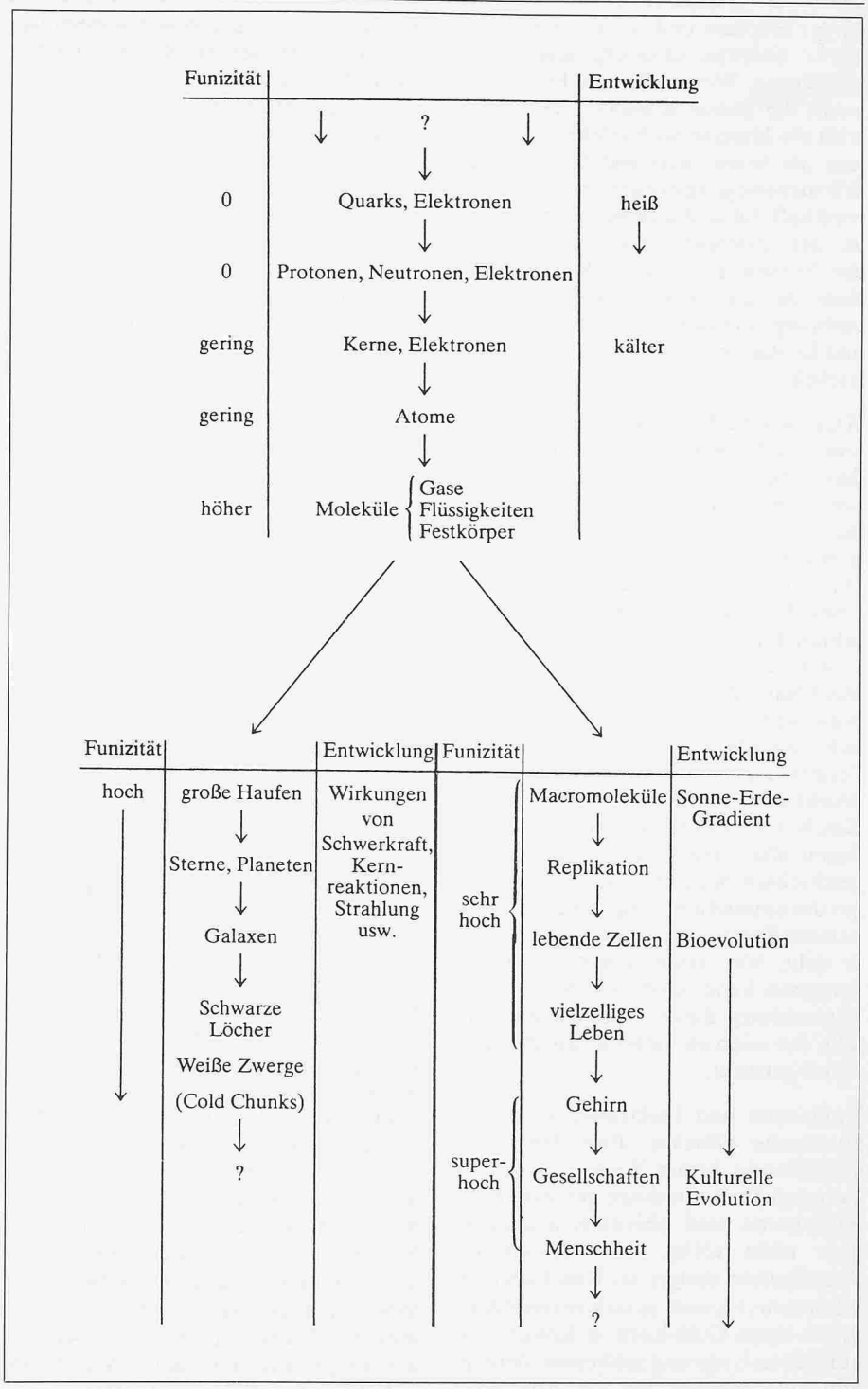
Die in der Natur vorgefundenen Strukturen können als eine Hierarchie aufgefasst werden. Wir wollen sie in der folgenden Weise ordnen: Zunächst sind da die sogenannten *«Quarks»* – die Bausteine von Protonen und Neutronen – und die *Elektronen.* Mit ihnen beginnen wir, weil sie die elementarsten Objekte sind, die man heute kennt; vielleicht stellt sich künftig heraus, dass sie zusammengesetzter Natur sind. Die Quarks bilden zusammen *Protonen* und *Neutronen,* diese bilden zusammen *Atomkerne;* die *Kerne* und die *Elektronen* bilden zusammen *Atome,* und *Atome* verbinden sich zu *Molekülen.* An dieser Stelle verzweigt sich der Weg. Auf dem ersten Weg bilden Moleküle zusammen *Flüssigkeiten* und *kristalline Gruppen,* die zu *Mineralien* und *Gesteinen* zusammentreten; diese bilden zusammen *Planeten* und *Sterne,* die wiederum *Galaxien* bilden, aus denen zusammen sich*ein Universum* bildet.

Der zweite Weg wird auf bestimmten Planeten eingeschlagen: *Moleküle verbinden sich zu Makromolekülen,* die wiederum *Zellen* bilden, aus denen *vielzellige Lebewesen* sich zusammensetzen – und vielzellige Lebewesen können *Gehirne* haben. Individuen einer gegebenen *Spezies* können *Gruppen, Stämme* und *Gesellschaften* bilden. Der zweite Weg, auf dem das Leben in die hierarchische Abstufung eintritt, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Einheiten fähig sind, sich *aus weniger gut organisierter Materie zu reproduzieren.*

Der Begriff der Hierarchie führt in die Naturwissenschaft einen *historischen*

Aspekt ein. Die Naturwissenschaft war während langer Zeit unhistorisch, wenn man vielleicht von der Geologie absieht; die Materie wurde in ihrem jeweiligen Zustand untersucht, und nach ihrer Geschichte wurde nicht gefragt. Heute ist die *Geschichte der Materie* ein wichtiges Anliegen. Aus dem hierarchischen Konzept können wir eine Vorstellung von der Entwicklung des Universums ableiten: Diese besteht in einem *Fortschreiten vom Elementaren zum Zusammengesetzten,* vom weniger Komplexen zum Komplexeren (siehe Abbildung). Fern in der Vergangenheit gab es den «Urknall», der irgendwie die elementaren Materieteilchen in einem heissen Zustand von hoher Energie hervorbrachte; Quarks und Elektronen bildeten sich; die Quarks verbanden sich zu Protonen und Neutronen; die letzten und die Elektronen verbanden sich zu Wasserstoff und Helium; dies führte zu örtlichen Materiekonzentrationen, aus denen Sterne, Planeten und Galaxien entstanden und aus denen sich andere, komplexere Elemente und allerlei Arten von verdichteter Materie bildeten. Auf manchen Planeten begann die Entwicklung von Makromolekülen, von sich selbst reproduzierenden Zellen, von vielzelligen Arten und schliesslich von denkenden Wesen. Über manche Etappen dieser Geschichte, so etwa die ursprüngliche Produktion von Quarks und Elektronen nach dem «Urknall», können wir bisher nur Vermutungen anstellen.

Diese *evolutionäre* Geschichte der Welt – vom «Urknall» bis zum gegenwärtigen Universum – besteht in einer Reihe von Schritten, die vom Einfachen zum Komplizierten, vom Ungeordneten zum Organisierten, vom formlosen Gas der Elementarteilchen zu den morphischen Atomen und Molekülen, weiter zu den noch stärker strukturierten Flüssigkeiten und Festkörpern und schliesslich zu den hochorganisierten lebenden Organismen führen. Die Natur hat offenkundig eine *Tendenz fort von Unordnung und hin zu Ordnung und Organisation.*



Hierarchie der Materie

Die Tendenz zur höheren Ordnung scheint dem *zweiten Hauptsatz der Thermodynamik* zu widersprechen, demzufolge die Unordnung in der Natur zunehmen muss. Die umgekehrte Tendenz ist aber auch eine Folge des zweiten Hauptsatzes, wenn Materie nicht von ihrer Umwelt isoliert ist. So wird eine Substanz, die anfangs in Gestalt eines ungeordneten heissen Gases vorliegt, abkühlen und schliesslich geordnete Kristalle bilden. Sie kann durch Kontakt mit ihrer Umgebung abkühlen, aber auch im leeren Raum würde sie ihre Wärme durch Strahlung verlieren. Der zweite Hauptsatz besagt, dass der Gewinn an Ordnung in dem Kristall mehr als ausgeglichen wird durch den Verlust an Ordnung, der eintritt, wenn die Wärme sich in die Umgebung oder in die Unendlichkeit des dunklen Raumes ausbreitet.

Materie ist nie vollständig von ihrer Umgebung isoliert und verliert ständig Wärme, die in einer sehr ungeordneten Form von relativ hoher Entropie entweicht. Folglich muss nach dem zweiten Hauptsatz in einer warmen Substanz, die mit ihrer Umgebung in Kontakt ist, die Ordnung zunehmen. (*David Hawkins,* mit dem ich diese Fragen häufig diskutierte, und ich haben diese Folgerung als Vierten Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet.) Grosse Schritte in Richtung auf mehr Ordnung und Organisation finden besonders in Anwesenheit eines *starken Temperaturgradienten* statt wie etwa in dem System Sonne-Erde, wo eine Strahlung von hoher Temperatur (niedriger Entropie) auf eine kühlere Region trifft. Sie ist die Grundlage der *Photosynthese,* des Aufbaus von Makromolekülen, und sie liefert die nötige Energie und Ordnung für die in der ganzen belebten Welt zu beobachtenden Strukturen.

In der belebten und in der unbelebten Natur bedeutet Ordnung etwas Verschiedenes. Wenn alles zu Ende sein, wenn die Sonne erloschen sein wird, wird die Materie noch stärker geordnet sein als heute, weil jegliche zufällige Wärmebewegung erstarrt ist. Aber alles wird kalt, tot und unwandelbar sein. Es ist der *Temperaturgradient* zwischen der heissen Sonne und der kühleren Erde, der die lebendige Ordnung hervorbringt, die sich durch Reproduktion und Evolution ständig wandelt und entwickelt.

Wenn wir die Entwicklung der Materie von den Elementarteilchen bis hin zu den höheren Formen betrachten, wird uns vielleicht manche interessante Beobachtung auffallen. So sind bestimmte Strukturen «geschichtslos». Durch die Untersuchung eines Quarks, eines Protons oder eines Elektrons erfahren wir nichts von ihrer Geschichte – sie sind elementar, sie besitzen keine Merkmale, die auf ihre Vergangenheit hinweisen. Um diesen Gedanken deutlicher zu machen, möchte ich eine neue Terminologie einführen, mit der ausgedrückt wird, ob *Informationen über die Geschichte bestimmter Strukturen* vorliegen oder nicht. In einer seiner Kurzgeschichten beschreibt *Jorge Luis Borges* die entsetzliche Lage eines Mannes namens Funes, der keine Einzelheit die er sieht, hört, empfindet oder erfährt, vergessen kann. *Cyril Smith* hat unter Verwendung dieses Namens ein Objekt, das «sich an nichts erinnert», *afuneisch* genannt.

Nukleonen und Elektronen sind sehr afuneische Objekte. Ihre Merkmale enthüllen in keiner Weise, was in der Vergangenheit mit ihnen geschehen ist. Atomkerne sind ebenfalls afuneisch, aber nicht völlig. Wir können aus Atomkernen einiges an Geschichte erschliessen; handelt es sich beispielsweise um einen Gold-Kern, so können wir auf seinen Ursprung schliessen, denn es gibt gute Gründe für die Annahme, dass schwere Elemente wie Gold, Blei und Silber während einer Supernova-Explosion erzeugt wurden. Ein Kern hat folglich einen leichten Anflug von Funizität, ebenso wie Atome und Moleküle.

Das Gefüge eines Kristalls kann beträchtliche Information über seine Vergangenheit liefern, allerdings nicht, wenn es sich – wie die Physiker sagen – um einen Einkristall handelt, bei dem die Atome vollkommen regelmässig angeordnet sind. Ein solcher Kristall ist schwer zu erzeugen, und er wäre tatsächlich recht afuneisch. Das Gitter eines gewöhnlichen Kristalls weist dagegen eine Vielzahl von Fehlstellen und Dislokationen auf, die durch die Art, wie das Material präpariert worden ist, hervorgerufen werden. So weisen zahlreiche Fehlstellen darauf hin, dass ein Kristall geschmolzen war und plötzlich abkühlte, während nur wenige Fehlstellen den Schluss zulassen, dass er allmählich abkühlte. Die Oberfläche eines Metalls weist einen hohen Grad von Funizität auf: Ein erfahrener Metallurg kann anhand der Linien und Strukturen auf der Oberfläche nicht nur bestimmen, wie ein Metall hergestellt wurde, sondern sogar, wann es hergestellt wurde.

In noch grösserem Umfang kommen funeische Eigenschaften bei sich selbst reproduzierenden Strukturen zum Ausdruck. Eine sich selbst reproduzierende Zelle enthält nicht nur ihre eigene Geschichte, sondern die Geschichte aller ihrer Vorfahren: ihre gesamte Evolution ist ihr einbeschrieben. Bei sich selbst reproduzierenden Strukturen selektiert der Mechanismus der Evolution die nützliche oder zweckdienliche Komplexität, und aus dieser Organisation können wir die Geschichte erschliessen.

Die letzte Stufe innerhalb der Linie der Selbstreproduktion ist das *Gehirn*. Es enthält nicht nur die Geschichte seiner Vorfahren, sondern es verleibt sich durch Kommunikation auch die Geschichte seiner Zeitgenossen ein; in diesem Fall verbinden sich *Evolution und Kommunikation,* um eine noch grösser Funizität darzustellen. Die Hirnforschung ist gegenwärtig einer der bedeutendsten inneren Grenzbereiche. An schwierige Probleme wie etwa die Natur des Denkens und des Gedächtnisses geht man von zwei Seiten heran, mit neurophysiologischen Methoden – dabei wird die Physik, die Chemie und die Biologie des Nervensystems erforscht – und mit psychologischen Methoden – dabei wird das Gehirn anhand seiner inneren Manifestation von Denken und Empfinden untersucht. Man kann sich diese Forschung so vorstellen, als würde von zwei Seiten her ein Tunnel gebohrt; die beiden Ansätze haben sich noch nicht getroffen, aber wir hoffen, dass sie eines Tages zusammentreffen werden.

Die Erforschung der sozialen Beziehungen zwischen Individuen einer gegebenen Art – seien es Tiere oder Menschen – steckt noch in den Anfängen. Wir suchen tastend nach geeigneten Methoden, Begriffen und Sprachen, die es uns erlauben, zu Formulierungen und Schlussfolgerungen zu gelangen, die den Naturwissenschaften an objektiver Gültigkeit nicht nachstehen. Wir werden bei der Erörterung der Schranken der wissenschaftlichen Methode darauf zurückkommen.

Innere Schranken der Wissenschaft

Kommen wir nun von den Grenzbereichen zu den Schranken der Wissenschaft. Ist die Kraft der wissenschaftlichen Erkenntnis in irgendeiner Weise beschränkt? Gibt es Beobachtungs- oder Erfahrungstatsachen, die niemals mit den Methoden der Wissenschaft erklärbar oder verstehbar sein werden? Offensichtlich gibt es zahlreiche Naturphänomene und Prozesse ausserhalb und innerhalb des menschlichen Geistes, die von der zeitgenössischen Wissenschaft noch lange nicht verstanden sind. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es unüberschreitbare Schranken der wissenschaftlichen Erklärung gibt.

Voraussagen zu machen ist schwierig, besonders, wenn sie die Zukunft betreffen, hat ein dänischer Humorist gesagt. Ich möchte dennoch die Behauptung wagen, dass es tatsächlich derartige Schranken gibt. Ich sehe zwei recht unterschiedliche Anhaltspunkte für derartige Schranken; man kann sie wiederum als innere und äussere Schranken bezeichnen, die sich nun aber auf die wissenschaftliche Methode beziehen. Ich will mit der inneren Schranke beginnen. Sie beruht auf *«Verstärkungseffekten»*. Was damit gemeint ist, soll ein einfaches Beispiel zeigen. Betrachten wir das Schicksal eines einzelnen Moleküls in einem Gas, etwa in der Atmosphäre. Können wir das Schicksal des Moleküls im Zeitablauf vorhersagen? Die Antwort ist mit Sicherheit negativ. Ganz geringfügige Abweichungen in den Anfangsbedingungen werden bei jedem Zusammenstoss mit anderen Molekülen rasch verstärkt. Selbst wenn wir seine Anfangsbedingung mit grosser Genauigkeit kennen würden, wäre es praktisch unmöglich, seine Endposition zu bestimmen. Überdies setzt die Quantenmechanik der Genauigkeit der Anfangsbedingungen eine Grenze.

Diese Beschränkung scheint nicht sonderlich beunruhigend zu sein. Was geht uns das Schicksal eines Moleküls an? Es ist für das Verhalten des Gases nicht relevant. Was uns interessiert, sind Druck, Temperatur, die Dichteschwankungen usw., alles Dinge, für die das Schicksal eines einzelnen Moleküls irrelevant ist.

Ähnliche Beispiele findet man in der Entwicklung von Sternensystemen. Die exakte Natur der Haufenbildung von Sternen oder Galaxien lässt sich unmöglich vorhersagen, obwohl man vorhersagen kann, dass einige Haufen sich aufgrund gravitationaler Verstärkung geringfügiger Dichteschwankungen bilden müssen. Auch hier sind wir nicht

daran interessiert, welcher Stern sich in welchem Haufen befindet.

Dies sind Beispiele von Fällen, in denen *kleine Ursachen grosse Wirkungen* haben. Solche Situationen sind unter den Naturerscheinungen weit verbreitet. In den angeführten Beispielen waren die unserem Verstehen gezogenen Schranken *irrelevant*. Wenn wir uns jedoch den Phänomenen des Lebens nähern, werden sie entscheidend. Betrachten wir zwei Experimente mit einem Röntgenstrahl. Im ersten setzen wir ein Kristall diesem Strahl aus, im anderen ein lebendes Bakterium. Die Wirkungen auf dem Kristall lassen sich recht genau vorhersagen, da es völlig irrelevant ist, von welchem Atom der Strahl absorbiert wird. Die Wirkungen auf das Bakterium hängen entscheidend davon ab, welche Atomgruppe im gen-tragenden Teil der Zelle von dem Strahl getroffen wird. Hier ist es wesentlich, wo das Photon getroffen hat, aber es ist nicht vorhersagbar.

Die *biologische Evolution* ist ein hervorragendes *Beispiel für relevante Verstärkungsprozesse*. Geringfügige Ereignisse im atomaren Massstab, die entweder prinzipiell oder praktisch unvorhersagbar sind, haben grosse Auswirkungen auf die Struktur des entstehenden Phänotyps. Diese Auswirkungen sind bedeutsam und relevant, weil sie durch die Replikation und natürliche Auslese beibehalten und vermehrt werden. Der Verlauf der Evolution ist unvorhersagbar, abgesehen von ihrer generellen Tendenz zu besserer Anpassung an die Umwelt.

Der evolutionäre Verstärkungseffekt wurde mit der Entwicklung des *Nervensystems* und des *Gehirns* gesteigert. Er führte zu Mechanismen, bei denen molekulare Vorgänge im Gehirn einzelner Tiere ihre Verhaltensweisen bestimmen. Mit der Entwicklung der menschlichen Art trat eine neue Erscheinung auf: das *kumulative Lernen*. Dank der Entstehung von Sprache und Dokumenten bedeutete der Tod eines Individuums nicht länger die Auslöschung jeder erlernten Erfahrung. Es trat eine neuer Typ der Evolution auf, die *kulturelle Evolution*, in der Verhaltensweisen sich unabhängig von genetischen oder umweltbedingten Ursachen ändern. Die Verstärkungen nervöser Prozesse und die Rückkoppelung der Wirkungen an das Gehirn schufen ein kompliziertes System von Wirkung und Wechselwirkung, aus dem autonome Strukturen entstanden. Wir bezeichnen sie als Kulturen oder Zivilsationen. Sie haben nicht mehr ausschliesslich das Überleben der Art, sondern auch das Überleben dessen, was wir *Ideen* nennen könnten, zum Leitprinzip. Ferner werden nicht mehr allein durch die natürliche Umwelt oder durch Genmutationen Veränderungen hervorgerufen, sondern es sind umgekehrt in wachsendem Masse die Zivilisationen, welche die Umwelt verändern.

Kann die Naturwissenschaft mit Phänomenen dieser Art fertigwerden? *P. Medawar* nannte die *Wissenschaft eine Kunst des Möglichen*. Ihre Methoden beruhen auf der Reproduzierbarkeit der Phänomene, auf dem Vergleich zwischen Theorie und Experiment. Sie verlangt, dass zur Überprüfung der Hypothesen reproduzierbare Bedingungen hergestellt werden. All das wird zweifelhaft, wenn wir es mit relevanten Verstärkungseffekten von einzigartigen Ereignissen zu tun haben.

Bei biologischen und gesellschaftlichen Sachverhalten stehen wir vor der Tatsache, dass die genetische Konstitution und der Gedächtnisinhalt eines Individuums in der Tat einzigartig sind. Es gibt bei einer höheren Art keine zwei Individuen, die miteinander identisch sind. In einigen Fragen sind die Unterschiede irrelevant – ein Chirurg wird dieselben Methoden bei Einstein verwenden wie bei einem Halbidioten –, doch können sie mit ihren verstärkten Auswirkungen auf Kulturen und Gesellschaften entscheidend werden. Das schliesst nicht die Möglichkeit aus, für bestimmte durchschnittliche Effekte allgemeine Regeln und Gesetze festzustellen, aber bei so vielen biologischen und menschlichen Phänomenen ist das Spezifische relevant, nicht das Allgemeine.

Gewiss wird die weitere Entwicklung der neurologischen Forschung uns mehr Einsichten in die Mechanismen des Gehirns verschaffen. Es bleibt jedoch fraglich, ob dieser Wissenszuwachs uns verraten wird, was wir eigentlich wissen möchten, nämlich die Gründe bestimmter, spezifischer Entscheidungen von Individuen, die für Kulturen und Gesellschaften relevante Wirkungen hervorrufen. Hier ein extremes Beispiel: Wir mögen zu dem Schluss gelangen, dass in je hundert Zivilisationen durchschnittlich ein Hitler auftritt. In der Physik wäre das ein vernachlässigbarer Effekt, nicht aber in der Gesellschaft.

Äussere Schranken der Wissenschaft

Wir kommen nun zu den Beschränkungen der wissenschaftlichen Methode, die nicht aus dem Begriffssystem der Wissenschaft erwachsen. Ich führe wiederum einen besonderen Begriff ein, um diese Schranken zu kennzeichnen: Es gibt wichtige und relevante Phänomene und Erfahrungen, die der wissenschaftliche Beschreibung *«komplementär»* sind. Eine spezifischere Bedeutung erhielt der Begriff der Komplementarität durch *Niels Bohr*, der damit Situationen beschrieb, in denen es *mehrere inkommensurable und einander ausschliessende Methoden der Realitätsbeschreibung* gibt. Sie stellen verschiedene Aspekte dar, die einander ausschliessen, aber dennoch insgesamt zu unserem Verständnis des Phänomens beitragen. Solche komplementären Situationen treten sogar in der Physik auf, wenn es etwa darum geht, ein Atom durch den Quantenzustand oder durch die Position seiner Bestandteile zu beschreiben. Der Quantenzustand verschwindet, wenn es mit einem scharfen Instrument, mit dem das Elektron lokalisiert werden soll, beobachtet wird. Der Zustand wird wiederhergestellt, wenn man das Atom in Ruhe lässt und ihm genügend Zeit gibt, zu seiner ursprünglichen Form zurückzukehren. Beide Aspekte – Quantenzustand und Ort – sind einander komplementär; beide sind für eine vollständige Erkenntnis der atomaren Wirklichkeit notwendige Begriffe.

Wie *Bohr* oft betont hat, treten ähnliche Komplementaritäten in allen Bereichen der menschlichen Erkenntnis auf. Eine Situation kann auf verschiedene Weisen wahrgenommen werden, die unzusammenhängend oder sogar widersprüchlich erscheinen mögen, die aber für ein Verständnis der Situation in ihrer Totalität notwendig sind. Ein einfaches Beispiel mag im Augenblick genügen. Eine Beethoven-Sonate kann man physikalisch durch Untersuchung der Luftschwingungen analysieren; man kann sie ausserdem physiologisch und psychologisch durch eine Untersuchung der im Gehirn des Hörers ablaufenden Prozesse analysieren. Es gibt jedoch eine andere Methode, die an das, was wir als das Wesentlichste an einer Beethoven-Sonate betrachten, näher herankommt: sich mit dem unmittelbaren Eindruck der Musik zu befassen.

Die folgende Anekdote mag als Beispiel für zwei komplementäre Betrachtungsweisen dienen: *Felix Bloch* und *Werner Heisenberg* diskutierten über Probleme der Physik, und *Bloch* berichtete *Heisenberg* über einige neue Ideen im Hinblick auf bestimmte mathematische Strukturen des Raumes, als *Heisenberg*, dessen Geist auf einen komplementären Erfasssungsweg abgeschweift war, ausrief: «Der Raum ist blau, und es fliegen Vögel in ihm!»

Wenn es um Fragen der *Ethik* und der *persönlichen Beziehungen* geht, stehen wir vor einer ähnlichen Situation. *Ethisches, Recht und Unrecht, Gut und Böse, Würde und Demütigung* oder Be-

griffe wie *Lebensqualität und Glück* lassen sich nicht wissenschaftlich definieren. Gewiss ist es möglich, die nervlichen und psychischen Reaktionen zu untersuchen, die auftreten, wenn solche Ideen erlebt werden, doch bleibt ein gewichtiger Teil des Erlebens von dieser Untersuchung unberührt. Ebenso lassen sich *Liebe und Hass,* die *menschliche Aggression* oder die *intellektuellen Fähigkeiten verschiedener Rassen* wissenschaftlich untersuchen, doch brauchen die Untersuchungsergebnisse durchaus nicht für die sozialen Probleme der Menschen relevant zu sein, ja sie können sogar der Lösung dieser Probleme entgegenwirken.

Was diese verschiedene Betrachtungsweisen voneinander unterscheidet, ist nicht unbedingt der Gegensatz zwischen rationalem Denken und emotionalem Fühlen; man kann in rationaler Weise über emotionale Eindrücke, über Musik und andere Künste, über ethische Probleme, Menschenwürde und Lebensqualität sprechen und tut es auch. Ebenso kann man über wissenschaftliche Probleme, über die Wunder der Natur, die Unermesslichkeit des Raumes und die grossartige Evolution vom Urknall bis zum gegenwärtigen Universum in emotionaler Weise sprechen. In der jeweiligen Betrachtungsweise wird eine andere Art von Diskurs benützt; an den eigenen Wertmassstäben gemessen, erscheint er klar und bündig, doch wirkt er angreifbar und unbestimmt, wenn man die Forderungen der komplementären Betrachtungsweise zum Massstabe nimmt. Die verschiedenen Ansichten ergänzen einander, wir bedürfen aller, um die Bedeutung unserer Erfahrungen voll zu erfassen.

Die verschiedenen komplementären Ansätze schliessen einander aus. Durch eine genaue Beobachtung des Teilchenortes wird der Quantenzustand zerstört. Wenn wir den geistigen Gehalt der Sonate erfassen möchten, können wir uns mit den neurologischen Vorgängen des Musikhörens nicht befassen. Wir können jedoch von dem einen zum anderen übergehen. Der Quantenzustand kann wiederhergestellt werden. Bei der wissenschaftlichen Analyse gehen wichtige Aspekte von Kunst, Ethik oder menschlichen Beziehungen verloren, die aber wiedergewonnen werden können, wenn wir zur komplementären Betrachtungsweise übergehen. Nichts hinderte *Heisenberg, Blochs* mathematische Ansichten über den Raum zu verstehen, nachdem er sich über die Vögel am blauen Himmel gefreut hatte.

Leider zeigt der menschliche Geist einen gewissen *Widerstand gegen die Anerkennung komplementären Aspekte.* Er neigt sehr zu eindeutigen, allgemeingültigen Antworten, die andersartige Betrachtungsweisen ausschliessen. Immer, wenn eine bestimmte Denkweise sehr nachdrücklich und erfolgreich entwickelt wird, werden andere über Gebühr vernachlässigt. Der Schweizer Physiker und Philosoph *Markus Fierz* hat das prägnant ausgedrückt: «Die wissenschaftlichen Einsichten unserer Zeit werfen ein derart grelles Licht auf bestimmte Aspekte der menschlichen Erfahrung, dass sie den Rest in um so grösserem Dunkel lassen.»

Hier nun ein interessantes Beispiel aus einer Zeit, in der die wissenschaftliche Denkweise unterdrückt wurde: Im Jahre 1054, auf dem Höhepunkt des religiösen Glaubens in Europa, erschien eine *Supernova,* die heller war als jeder Planet. Sie blieb drei oder vier Monate lang sichtbar, doch keine einzige Chronik Europas erwähnt dieses Phänomen. Das religiöse Denken war im Mittelalter derart vorherrschend, dass das Erscheinen eines hellen Sterns nicht als eine relevante, bemerkenswerte Tatsache betrachtet wurde.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Wissenschaft als solche ihre Wurzeln und Ursprünge ausserhalb des ihr eigentümlichen Bereichs des rationalen Denkens hat. Es scheint in der Tat ein *«Gödelsches Wissenschafstheorem»* zu geben, nach dem *Wissenschaft nur innerhalb eines umfassenderen Rahmens nichtwissenschaftlicher Probleme und Fragen möglich ist.* Der Mathematiker *Gödel* hat bewiesen, dass ein Axiomensystem nie aus sich selbst begründet werden kann: Um seine Gültigkeit zu beweisen, müssen Aussagen, die nicht dem System entstammen, herangezogen werden. In ähnlicher Weise ist die wissenschaftliche Aktivität unausweichlich eingebettet in einen sehr viel umfassenderen Bereich menschlicher Erfahrung. Die Wissenschaft muss eine unwissenschaftliche Grundlage haben: Alle Wissenschaftler und die Gesellschaft müssen sich darüber einig sein, dass die wissenschaftliche Wahrheit relevant und wesentlich ist.

Die Wertschätzung der Wissenschaft würde gefördert, wenn Wissenschaftler wie Nicht-Wissenschaftler sich stärker bewusst wären, dass es *verschiedene Wege* gibt, die menschliche Erfahrung zu erfassen, – wie etwa *Kunst, Dichtung* und *Literatur* – und andere Ausdrucksformen, die teilweise mit *Religion* und *Mythologie* verwandt sind. Würde dieses Bewusstsein gestärkt, so würde das Vorurteil gegen Wissenschaft und Technik weitgehend entkräftet. Zu einem guten Teil beruht dieses Vorurteil auf einem unbewussten Widerstand gegen den unausgesprochenen Anspruch, nur die wissenschaftliche Betrachtungsweise sei legitim und vernünftig. Würde man auch andere Denkweisen als gültig anerkennen, dann würden Pseudowissenschaften wie Astrologie und ESP (aussersinnliche Wahrnehmung) nicht eine solche Blüte erleben; in ihnen äussern sich unterdrückte natürliche Bedürfnisse in perverser Form, weil die wissenschaftliche Methode derzeit als die einzig «ernsthafte» Art des Umgangs mit der uns umgebenden Welt gilt.

Die menschliche Erfahrung ist sehr viel reicher, als sich mit den Begriffen eines bestimmten Denksystems ausdrücken lässt. Wir müssen offen sein für vielfältige, unterschiedliche und scheinbar widersprüchliche Weisen, wie der Geist auf die Realität der Natur, unserer Erfindungen und der menschlichen Beziehungen reagiert. Es gibt viele Wege des Denkens und Fühlens, und jeder enthält ein Stück dessen, was wir als die Wahrheit betrachten mögen. Wissenschaft und Technik verfügen über einige der wirksamsten Mittel, um zu tieferer Erkenntnis zu gelangen und die Probleme zu lösen, vor denen wir stehen – Probleme, die teilweise gerade durch die gedankenlose Anwendung dieser Mittel geschaffen wurden. *Wissenschaft und Technik bieten aber nur einen der möglichen Zugänge zur Realität:* Um den Sinn unserer Existenz vollständig zu erfassen, bedarf es auch der anderen. Wir werden alle Betrachtungsweisen brauchen, um die Lage der Menschheit, die so vielen unserer Mitmenschen ein lebenswertes Leben verwehrt, zu verändern.

Dieser Essay stützt sich teilweise auf einen früheren Aufsatz des Verfassers, der unter ähnlichem Titel im *American Scientist 65,* 405 (1977) erschienen ist.
Autorisierte Übersetzung aus dem Amerikanischen von Friedrich Griese.