

# Metamorphosen der Materie

Von

**G. Eder**

(Vorgelegt in der Sitzung der math.-nat. Klasse am 22. Jänner 1998  
durch das w. M. Gernot Eder)

## 1. Einleitung

Unter Metamorphosen sollen Verwandlungen, Umwandlungen, die zeitliche Variabilität und Formenvielfalt der Phänomene auf einer gemeinsamen materiellen Basis verstanden werden. Materie bedeutet in diesem Zusammenhang atomare Materie, die aus Festkörpern, Molekülen, Atomen, Elektronen und Atomkernen aufgebaut ist und durch Gravitation, starke und elektromagnetische Kräfte zusammengehalten wird. Dabei erhebt sich die Frage, wie denn durch fundamentale Kräfte, durch Stöße zwischen Atomen und unter Elementarteilchen nicht bloß die Farbenpracht der unbelebten Natur, sondern auch die Formenvielfalt und Spezifität des Lebendigen und der menschlichen Kultur verstanden werden können.

## 2. Historische Wurzeln

Die grundsätzliche naturphilosophische Fragestellung nach den zeitlich unveränderlichen Fundamenten der zeitlich variablen Phänomene ist mehr als zweieinhalb Jahrtausende alt. Im sechsten vorchristlichen Jahrhundert entfalteten K'ung Fu-Tse in China und Gautama Siddharta (Buddha) in Indien eine Ethik und eine menschliche Vollkommenheitslehre. Die Propheten Zoroaster in Persien und Deutero-Jasaja im babylonischen Exil lehrten den ersten klaren Monotheismus, während in Milet an der südlichen Westküste Kleinasiens die ionischen Philosophen Thales,

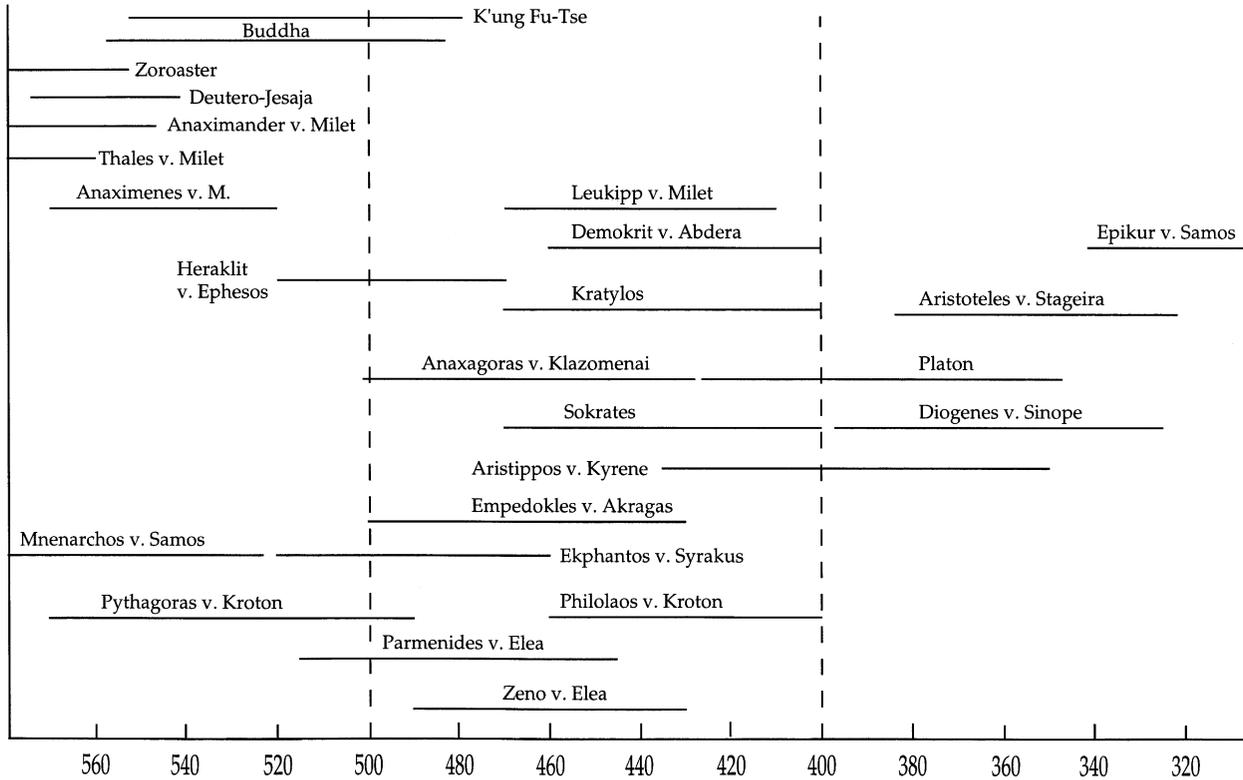
Anaximander und Anaximenes die Naturwissenschaften begründeten (Abb. 1). Sie gehen von einem universalen Urstoff (Wasser oder Luft) aus, der durch Metamorphosen in andere materielle Formen übergehen kann.

Im gleichen Zeitraum läßt sich Mnenarchos von Samos in Kroton, dem heutigen Croton an der Ostküste von Kalabrien nieder. Sein Sohn Pythagoras gründet dort eine zahlenorientierte religiöse Gemeinschaft und legt damit das Fundament für die mathematische Struktur der Naturwissenschaften.

Um 500 v. Chr. sind die Ansichten über das Verhältnis zwischen den variablen Phänomenen und ihren stabilen Grundlagen bereits stark polarisiert; sie äußern sich in den extremen Positionen von Heraklit im Osten und Parmenides im Westen. Heraklit lehrt in Ephesos, an der Westküste Kleinasiens nördlich von Milet, daß alles im Fluß sei und daß der Fluß, aus dem man heraussteigt, bereits ein anderer sei als der, in den man hineingegangen sei. Seine Ideen werden von Kratylos weitergeführt, der sogar meinte, daß der Fluß bereits beim Hineinsteigen mit jedem Schritt ein anderer werde und daß daher Kategorisierungen und gültige Aussagen grundsätzlich nicht möglich seien. Kratylos gilt als einer der Lehrer Platons vor Sokrates und hat Platon möglicherweise zu der gegensätzlichen Vorstellung von ewigen Ideen provoziert.

Parmenides lehrt in Elea südlich von Paestum an der Westküste Italiens das Gegenteil: Das Seiende sei unveränderlich und jedes veränderliche Phänomen sei bloß Schein und Täuschung. Zeno von Elea hat als Nachfolger des Parmenides mit Hilfe von Paradoxien, beispielsweise dem Wettlauf von Achilles und der Schildkröte, zu beweisen versucht, daß Veränderungen nicht wirklich stattfinden können. Es ist bemerkenswert, daß heute im Rahmen der Neutroneninterferometrie als "Zenoeffekt" die Behauptung diskutiert wird, daß sich die Polarisationsrichtung des Neutrons nicht ändert, wenn man in kurzen zeitlichen Abständen diese Richtung unendlich oft mißt.

Die beiden Extrempositionen von Heraklit und Parmenides waren der Entwicklung der Naturphilosophie nicht besonders förderlich; glücklicherweise tritt in der ersten Hälfte des fünften Jahrhunderts ein großer Geist auf: Empedokles von Akragas, dem heutigen Agrigento an der Südküste Siziliens. Nach Empedokles sind die unveränderlichen Elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer die Basis der materiellen Vielfalt, die durch die Mischungsverhältnisse der Elemente zustande kommt. Die Dynamik für die Mischung und Entmischung der Elemente ist durch die Kräfte Liebe und Streit bestimmt. Diese Lehre von den vier Elementen dominierte bis in das 18. Jahrhundert unserer Zeitrechnung. Sie wurde in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. Chr. wesentlich verfeinert durch die Atomisten Leukipp von Milet und Demokrit von



Metamorphosen der Materie

Abb. 1. Vertreter der Naturphilosophie im 6., 5. und 4. Jahrhundert vor Christus. Die ausgezogenen Linien entsprechen der vermutlichen Lebensdauer. In der Vertikalen entspricht der Weg von unten nach oben der geographischen Anordnung der Geburts- oder Wirkungsstätten von Westen nach Osten

Abdera an der Südküste Thrakiens. Leukipp gilt als Lehrer Demokrits; aufgrund der Quellen lassen sich ihre Beiträge kaum trennen. Wahrscheinlich stammt auch Leukipp aus Abdera, weil 494 v. Chr. Milet von den Persern zerstört worden ist.

“atomos” heißt unzerscheidbar. Somit sind die Atome die letzten materiellen Grundbausteine, die sich in ihren Eigenschaften nicht ändern und nicht mehr aus Teilen zusammengesetzt sind. Damit entsprechen die Atome Demokrits eher den heutigen Fundamentarteilchen, nämlich den Leptonen, Quarks und Eichbosonen, und weniger den Atomen der chemischen Elemente, die von Atomkernen und Hüllenelektronen konstituiert werden. Demokrit kann sich auf eine Reihe von empirischen Fakten stützen wie das Verhalten von metallischen Legierungen, Filtern von Salzwasser, Masseverlust bei Austrocknung, Dehnung und Kompression, Geruch,... Dabei sind die folgenden Voraussetzungen zu machen:

- (a) Alles ist aus Atomen zusammengesetzt. Es gibt nur Atome und den leeren Raum. Die Atome sind nicht mehr zusammengesetzt.
- (b) Es gibt Atome unterschiedlicher Größe.
- (c) Es gibt unendlich viele Atomsorten
- (d) Atome haben keine Substrukturen und keine spezifischen Eigenschaften wie Farbe. Die Vielfalt der makroskopischen Phänomene ist ausschließlich durch die räumliche Anordnung und die relative Stellung der Atome zueinander bedingt.
- (e) Auch Kultur und Geist sind durch Atommischungen verständlich. Notfalls werden dazu auch für die Psyche spezifische Atome postuliert.

Trotz der erwähnten empirischen Stützen der Atomtheorie setzte bereits im 4. Jahrhundert harte Kritik am Atomismus ein, deutlich formuliert von Aristoteles von Stageira. Stageira oder Stagira liegt westlich von Abdera und in der Nähe der Ostküste der Halbinsel Chalkidike. Aristoteles blieb bis zum Tod Platons in Athen und übersiedelte später nach Mytilene an der Ostküste der Insel Lesbos.

### 3. Kritik am Atomismus

Die Einwände richteten sich gegen alle genannten Voraussetzungen des Atomismus, nicht aber gegen die empirischen Befunde.

- (a) Manche Denker lehnten grundsätzlich den leeren Raum ab, der begrifflich vom “Nichts” kaum unterschieden wurde.

- (b) Wenn die Atome unterschiedliche Größe haben, so müßten auch solche Atome existieren, die mit freiem Auge sichtbar sind, weil kein einsichtiger Grund für eine Größenbeschränkung angegeben werden könne.
- (c) Auch unendlich viele Punkte können kein Kontinuum konstituieren. Bei endlicher Atomgröße kann es weder unendlich viele Atome geben, noch ist einzusehen, daß in diesem Fall die Teilbarkeit beschränkt sein sollte.
- (d) Unterschiedslose und eigenschaftslose Atome können bloß zu eigenschaftslosen makroskopischen Gebilden führen, weil durch die räumliche Anordnung der Atome keine neuen Qualitäten hinzukommen.
- (e) Während sich die ersten vier Argumente entkräften ließen, war das entscheidendste Argument gegen den Atomismus vom 4. Jahrhundert v. Chr. bis zum 20. Jahrhundert n. Chr. der Vorwurf, daß Willensfreiheit, Verantwortung und Zielstrebigkeit menschlichen Handelns nicht verstanden und nicht gefordert werden können, wenn Atomstöße und naturgesetzliche Notwendigkeit alles Geschehen bestimmen. Dieses schwerwiegende ethisch-juridische Argument ist auch die Hauptursache dafür, daß die Atomidee trotz empirischer Erfolge über mehr als 2000 Jahre kaltgestellt, vergessen und durch die Elemente des Empedokles sowie durch die vier Ursachen des Aristoteles verdrängt wurde: Zu Material- und Wirkursache kommen von außen noch Form- und Finalursache hinzu, wodurch zwar die Ethiker beruhigt werden, die Inkonsistenzen und der Zusammenbruch des philosophischen Systems aber bereits vorprogrammiert sind.

Platon, der aus einer vornehmen Athener Familie stammt, hat mit Hilfe der Pythagoräer auf einer geometrischen und abstrakten Basis versucht, die Atomtheorie vor allem gegen den Einwand (e) zu retten. Nach dem Tod des Sokrates (399 v. Chr.) war Platon dreimal in Sizilien, wo er durch den Staatsmann Dion von Syrakus (409–354 v. Chr.) unterstützt wurde. Dion war ein Schwager des Tyrannen Dionysios I. (430–354 v. Chr.), den Friedrich Schiller in der "Bürgschaft" verewigt hat. Platon geht in seinem Konzept von den 5 regelmäßigen Vielfächern aus. Dabei lassen sich zunächst Tetra-, Okta- und Ikosaeder aus 4, aus 8 und aus 20 gleichseitigen Dreiecken zusammensetzen. Dazu kommen der Würfel (Oberfläche mit 6 Quadraten oder 12 gleichschenkelig rechtwinkligen Dreiecken) und der Dodekaeder (12 regelmäßige Fünfecke). Platon ordnet Tetra-, Okta- und Ikosaeder den Feuer-, Luft- und Wasseratomen zu, die somit durch Umordnung der Oberflächendreiecke ineinander umge-

wandelt werden können. Der Würfel wird den Erdatomen zugeordnet. Die Fünfecke des Dodekaeders lassen sich nicht in Dreiecke zerlegen; daher wird dieser regelmäßige Polyeder der Himmelskugel zugeordnet, die ohnedies ewig ist. Johannes Kepler (1571–1630) hat 2000 Jahre später in der Planetenbewegung nach diesen Weltharmonien gesucht und seine drei berühmten Gesetze gefunden. Heute weiß man, daß einfach rationale Verhältnisse der Umlaufzeiten zu der des Jupiter zu Resonanzkatastrophen führen. Akustische Harmonie für einen Pythagoräer kann für die Umlaufbahn eines kleinen Planeten im Sonnensystem das Ende bedeuten.

Für Platon standen die Metamorphosen der Elemente durch göttliche Kräfte im Vordergrund. Er hat diese Gedanken in seinem späten Dialog "Timaios" entwickelt, wobei mitunter trotz der dialogischen literarischen Form der Eindruck von meditativen Selbstgesprächen erweckt wird. Aristoteles lehnt auch diese Rettungsversuche ab, weil sie im Gegensatz zu Demokrits Argumenten sogar den Zusammenhang mit der Empirie vermissen lassen. Ende des 4. Jahrhunderts hat Epikur von Samos versucht, den Atomismus vor allem gegen die Argumente des Aristoteles zu verteidigen: Die unendlich vielen Atomsorten werden zu unübersehbar vielen abgeschwächt; die Atome werden mit Haken und Ösen versehen, um sie mit spezifischen Eigenschaften auszustatten. Als Ethiker zeigte er für Empirie wenig Interesse. Obwohl Epikur in der christlichen Tradition als Hedonist verrufen ist, hatte die Lust in seiner Ethik doch eine besondere Note. Denn wenn man Diogenes Laertios (3. Jahrhundert n. Chr.) glaubt, so hat Epikur unter anderem gesagt, daß es nicht möglich sei, ohne das Studium der Naturwissenschaften (damals noch als *physiologia* bezeichnet) ungetrübte Lustempfindung zu erlangen. Mit Epikur ist im Wesentlichen die Naturphilosophie der Atomisten im Griechischen Kernland und in den Kolonien zu Ende gegangen.

In der ersten Hälfte des 1. Jahrhunderts v. Chr. greift als einziger Römer Lukrez (Titus Lucretius Caro, 98–55 v. Chr.) die Atomtheorie Demokrits auf. Um die Willensfreiheit gegenüber dem Zwang der Naturgesetze zu retten, führt er eine Abweichung (*declinatio*) der Atombewegungen von den Naturgesetzen ein. Er wird deshalb von Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.) gerügt, der ein solches Postulat für einen Naturwissenschaftler als schändlich empfindet. Cicero lehnt aber auch die Version Demokrits ab: Wenn bloß Atomstöße mit naturgesetzlichem Zwang jedes Geschehen determinieren, so ist es undenkbar, daß sich durch eine zufällige Anordnung von Lettern das römische Nationalepos, nämlich die "Annales" des Quintus Ennius (239–169 v. Chr.) ergeben. Jahrhunderte später wurden die gleichen Argumente für Goethes Faust und für die Anordnung der

Aminosäuren bei der Entstehung des Lebens auf der Erde ins Treffen geführt.

In der christlichen Philosophie wird Aristoteles verdrängt und Platon als proto-christlich interpretiert. Daher dominieren bis in das 12. Jahrhundert Mittel- und Neuplatonismus. Erst im 13. Jahrhundert wird durch Thomas von Aquin Aristoteles rezipiert, dessen Schriften über den arabischen Raum, über Marokko und Andalusien nach Italien und Frankreich gelangen.

#### 4. Die Rückkehr der Atome

Im 17. und 18. Jahrhundert brechen die aristotelischen Kausalitätskategorien in Physik und Chemie zusammen. Die vier aristotelischen Ursachen sind nicht mehr geeignet, Fall- oder Planetengesetze zu beschreiben. Im 18. Jahrhundert wird die Phlogistontheorie begründet und widerlegt. Damit verschwindet auch das Feuer als das letzte der vier Elemente des Empedokles; sie machen den chemischen Elementen Platz. Die chemische Analyse ermöglicht eine rasche Zunahme der bekannten chemischen Elemente. Für die heute bekannten 112 chemischen Elemente verteilt sich die Entdeckungsgeschichte folgendermaßen:

10	bis 1600	23 von 1851 bis 1900
23 von 1601 bis 1800		15 von 1901 bis 1950
27 von 1801 bis 1850		14 von 1951 bis 1997.

Dabei waren Elemente wie Blei, Zinn, Kupfer und Gold bereits im Altertum bekannt, während die in den letzten 60 Jahren entdeckten 24 Elemente durch Kernreaktionen erzeugt wurden und zum Teil bloß Lebensdauern in der Größenordnung von Millisekunden haben.

Auffällig ist die Kulmination um 1805, wo in 30 Jahren 20 Elemente entdeckt wurden. Es ist die Zeit des John Dalton (1766–1844), der aufgrund der Massenproportionsgesetze die Atome der chemischen Elemente und Verbindungen einführte. Die Dalton-Atome erfüllen zwar noch nicht die Demokritpostulate, sind aber in der Atomhierarchie wichtige Zwischenstufen, ohne die makroskopische Qualitäten und Metamorphosen unverständlich bleiben würden. Die Atomtheorie setzt ihren Siegeszug in Physik und Chemie fort mit Michael Faraday (1791–1867), mit dem Periodensystem der chemischen Elemente (Dmitri Iwanowitsch Mendelejew, 1834–1907, Julius Lothar Meyer, 1830–1895) bis zu Niels Bohr (1885–1962) und Erwin Schrödinger (1887–1961), ein Siegeszug der sich weder durch Gottfried Wilhelm Leibniz noch durch Ernst Mach bremsen läßt.

Im Jahr 1932 entdeckt James Chadwick das Neutron. Seither weiß man, daß die Dalton-Atome aus Elektronen in der Hülle, aus Protonen und Neutronen im Kern aufgebaut sind. Heute sind 2590 Atomsorten bekannt, die sich auf 112 chemische Elemente verteilen. Davon sind 286 Atomsorten oder Nuklide entweder stabil oder sie haben eine mittlere Lebensdauer, die mehr als 100 Millionen Jahre beträgt. Die Dalton-Atome sind aus Elementarteilchen zusammengesetzt. Bis zum Jahr 1930 waren neben dem Lichtquant oder Photon bloß die Atombausteine Elektron und Proton bekannt, deren Antiteilchen (positives Elektron und Antiproton) 1932 und 1956 entdeckt wurden. Bis heute hat sich die Zahl der leichten Teilchen oder Leptonen, zu denen das Elektron zählt, auf 12 erhöht. Die Zahl der schweren Teilchen (Baryonen und Antibaryonen), zu denen Proton und Neutron zählen, ist auf etwa 400 angestiegen. Dazu kommen die Mittelschweren oder Mesonen, von denen rund 200 nachgewiesen wurden. Die Gesamtzahl der Baryonen und Mesonen ist noch größer als angegeben, weil bei extrem kurzer Lebensdauer die Resonanzen, in denen die Teilchen aufscheinen, breiter werden und überlappen. Dadurch lassen sie sich nicht mehr separieren und identifizieren.

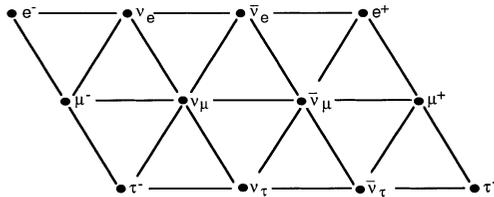
Mit der Einführung der Quarks als jenen Fundamenteilchen, die die Mesonen (Quark-Antiquarkpaar), die Baryonen (drei Quarks) und die Antibaryonen (drei Antiquarks) konstituieren, ist endlich nach zweieinhalb Jahrtausenden der Traum der Atomisten in Erfüllung gegangen. 36 Fundamenteilchenarten konstituieren mehr als 600 Elementarteilchensorten und sind selbst nicht mehr zusammengesetzt: 12 Leptonen (Elektronen, Myonen, Tauonen und die entsprechenden Neutrinos), 12 Quarks (up, down, charm, top, bottom und die entsprechenden Antiteilchen) und 12 Eichbosonen (1 Photon, 3 W-Bosonen und 8 Gluonen, die die elektromagnetischen, die schwachen und die starken Kräfte vermitteln).

Ein Fundamenteilchen ist das eigentlich Unteilige, wobei nicht einmal zusätzliche Kräfte angenommen werden müssen wie bei der Mischung und Trennung der Elemente des Empedokles, weil die 12 Eichbosonen bereits all jene Kräfte vermitteln, die für die Konstitution von Elementarteilchen, Atomkernen, Atomen und Molekülen, für die Vielfalt der chemischen Elemente und für die Elementumwandlungen durch Betazerfall notwendig sind. Bei Eichbosonen der Ruhemasse Null (Photonen und Gluonen) sind in einer minimalen Kopplung, die die Eichinvarianz der Theorie garantiert, sogar Art und Stärke der Kräfte fixiert; es sind also keine zusätzlichen Hypothesen erforderlich. W-Bosonen sind auch in Ruhe massiv; bei ihnen ist die Wechselwirkung auf komplizierte Weise zu ermitteln, nämlich durch die Einführung von Higgsfeldern, die eine spontane Symmetriebrechung ermöglichen.

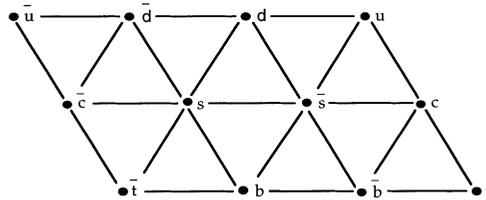
Weder bei den Higgsfeldern noch bei der Gravitation, die mit der Geometrie des Raum-Zeitkontinuums zusammenhängt, erscheint es zwingend zu sein, neue und spezifische Teilchen einzuführen.

Platon hätte seine Freude mit der graphischen Darstellung der Fundamentarteilchen (Abb. 2), der leichtesten Mesonen und Baryonen (Abb. 3) durch gleichseitige Dreiecke. Man erhält diese Figuren, wenn auf der Abszisse die elektrische Ladung nach rechts zunimmt und nach oben

## LEPTONEN



## QUARKS



## EICHBOSONEN

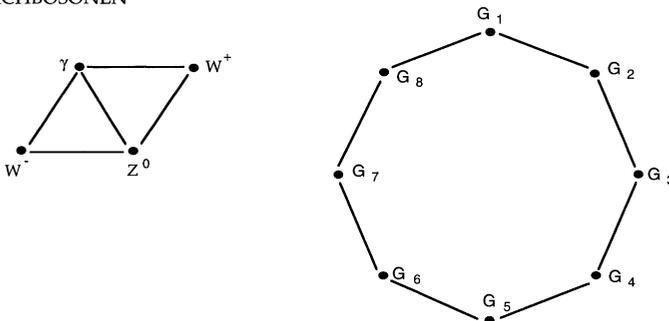
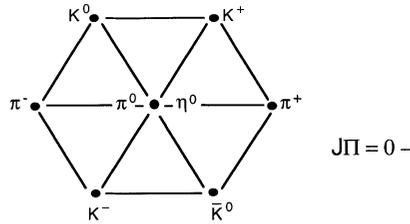


Abb. 2. Fundamentarteilchen. Leptonen, Photon ( $\gamma$ ) und W-Bosonen ( $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$ ) existieren auch als (freie) Elementarteilchen. Quarks ( $u$ ,  $d$ , ...) Antiquarks ( $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ , ...) und Gluonen ( $G_1$ ,  $G_2$ , ...,  $G_8$ ) sind aufgrund ihrer Farbladungen in Mesonen, Baryonen und Antibaryonen eingeschlossen

## MESONEN



## BARYONEN

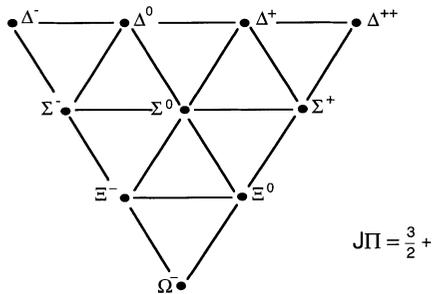
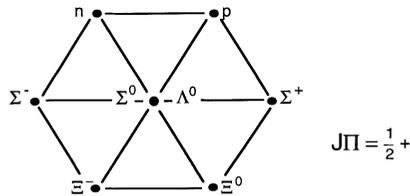


Abb. 3. Mesonen und Baryonen. Die leichtesten Mesonen (Eta-, Pi- und K-Mesonen) sind Quark-Antiquarkpaare, an denen sich bloß (u, d, s,  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$ )-Quarks beteiligen. Die leichtesten Baryonen umfassen neben dem Nukleon (Proton p, Neutron n) die Lambda-, Sigma-, Xi-, Delta- und  $\Omega$ -Baryonen. Sie werden durch drei leichte Quarks konstituiert  $\Delta^{++}$ (uuu) ...  $\Omega^-$ (sss)

die Teilchenart variiert. So wie der Pentagon-Dodekaeder eine Ausnahme bei den Vielflächern ist, so sind auch die Gluonen bei den Fundamentarteilchen eine Ausnahme, weil sie nicht mit der elektrischen Ladung, sondern mit sogenannten Farbladungen verknüpft sind, die die starken Kräfte kennzeichnen. In den letzten Jahrzehnten sind auch die schwersten Fundamenteilchen, nämlich die W-Bosonen und das top-Quark entdeckt worden (Abb. 2). Da Mesonen, Baryonen und Antibaryonen

aus Quarks und Antiquarks zusammengesetzt sind, lassen auch sie sich, je nach ihren speziellen Symmetrien wieder durch gleichseitige Dreiecke graphisch darstellen. Dabei sind diese Symmetrien durch die Vorgabe der Eigendrehimpuls- oder Spinquantenzahl  $J$  und des Paritätseigenwertes  $\Pi$  fixiert. Dieser kann je nach dem Spiegelungsverhalten des Teilchenzustandes bloß die Werte  $+1$  und  $-1$  annehmen (Abb. 3).

## 5. Später Sieg der Atomisten

Heute sind alle 36 Fundamentarteilchentypen entweder direkt (Leptonen, Quarks, Photon, W-Bosonen) oder indirekt (Gluonen) nachgewiesen. Alle ausgedehnten Systeme sind aus ihnen zusammengesetzt und lassen sich in ihrer spezifischen Dynamik verstehen. Das betrifft nicht bloß Volumina im Alltagsbereich ( $\approx 1\text{ m}^3$ ), sondern auch im Mikrokosmos ( $\approx 10^{-50}\text{ m}^3$ ) und in kosmischen Dimensionen ( $\approx 10^{53}\text{ m}^3$ ). Mit Hilfe der Fundamentarteilchen und ihrer Bindungszustände lassen sich auch alle Einwände gegen den Atomismus entkräften:

- (a) Die Scheu vor dem leeren Raum (horror vacui) ist in der gegenwärtigen Physik unberechtigt, weil die Teilchenfelder im gesamten Raum definiert sind. Selbst wenn in einem Raumgebiet Leptonen- und Quarkanzahl verschwinden, kann das physikalische Vakuum lokal in Teilchen-Antiteilchenpaare polarisiert werden.
- (b) Durch das Zusammenwirken von elektromagnetischen und starken Kräften mit der Quantenphysik (Schrödingergleichung, Pauliprinzip) können auch punktförmige Fundamentarteilchen zu einer Hierarchie von ausgedehnten Systemen mit unterschiedlichen Durchmessern  $D$  führen: Baryonen (Quark-Quarkbindung,  $D \approx 10^{-15}\text{ m}$ ), Atomkerne (Baryon-Baryonbindung,  $D \approx 10^{-14}\text{ m}$ ), Atome (Elektron-Kernbindung,  $D \approx 10^{-10}\text{ m}$ ), Moleküle (Atom-Atombindung,  $D \approx 10^{-9}\text{ m}$ ), Flüssigkeiten und Festkörper. Atomkerne können nicht beliebig groß werden. Für Kerne und damit auch für die Atome chemischer Elemente gibt es bei den räumlichen Dimensionen eine obere Schranke; denn das Wechselspiel von starken, elektrischen und schwachen Kräften läßt bloß einen engen Streifen von stabilen, lang- und kurzlebigen Kernen zu. Deshalb ist es unwahrscheinlich, daß auch bloß kurzlebige Elemente mit Protonenzahl  $Z > 120$  (Durchmesser  $D > 1,6 \cdot 10^{-14}\text{ m}$ ) existieren können. Erst wenn die Lineardimensionen in die Größenordnung von  $D \approx 10^4\text{ m}$  kommen, wird die Gravitation die dominierende Kraft und es kann wieder gebundene Systeme geben: Solche Riesenatomkerne mit Massen in der

Größenordnung der Sonnenmasse treten als Pulsare und als ruhige Neutronensterne in Erscheinung (Abb. 4).

- (c) Es gibt nur 36 Sorten von fundamentalen Teilchen. Die Gesamtzahl der freien und gebundenen Teilchen ist zwar im Prinzip unbeschränkt, weil bei einer genügend hohen Energiedichte entsprechend viele Photonen, Gluonen, Leptonen- und Quarkpaare erzeugt werden können. De facto ist aber auch die Gesamtteilchenzahl beschränkt, weil die Erhaltungssätze für Energie, Impuls, Drehimpuls und elektrische Ladung die möglichen Prozesse einschränken und unter irdischen Verhältnissen eine relative Stabilität der Nukleonen, Kerne, Atome und Moleküle garantieren. Die konstante Basis der zeitlich variablen Phänomene verlagert sich somit teilweise von den Elementen und Fundamentalteilchen auf die physikalischen Erhaltungsgrößen.
- (d) Die Atome Demokrits hatten weder Substrukturen noch besondere Eigenschaften wie sie makroskopische Körper aufweisen. Erst spätere Autoren haben aus apologetischen Gründen die Atome mit Ösen und Haken versehen. Doch Demokrit hat recht behalten: In der zwischen 1924 und 1928 entwickelten Quantenstatistik (Bose-Einstein- und Fermi-Diracstatistik) sind zwei gleichartige Fundamentalteilchen grundsätzlich ununterscheidbar. Der Zustand einer Elektronengesamtheit ist eindeutig und vollständig bestimmt, wenn man angeben kann, wie viele Elektronen sich in jedem Einelektronzustand befinden.

Demokrit behält auch darin Recht, daß die makroskopischen Eigenschaften wie Farbe, Härte und Leitfähigkeit eines Körpers bloß von der Anordnung der Atome und, wie man ergänzen darf, von der zwischenatomaren Elektronenverteilung (Unterschied zwischen Ionenbindung und chemischer Bindung) abhängen. Ein typisches Beispiel dafür ist der chemisch reine Kohlenstoff, der je nach Bindungstyp und Kristallstruktur als amorpher Ruß, Graphit, Diamant und als Fulleren in Erscheinung treten kann. Ganz allgemein gilt in der Quantenphysik, daß die Dynamik eines Systems durch die Schrödingergleichung für die Zustandsfunktion repräsentiert wird, während sich die möglichen Zustände und Eigenschaften des Systems durch die Periodizitäts- und Randbedingungen und damit durch die Atomanordnung voneinander unterscheiden. Also können ununterscheidbare Elektronen zu makroskopischen Eigenschaften führen, die bloß mit dem speziellen Vielelektronenzustand korreliert sind.

Ebenso hängen Farbe und chemische Eigenschaften eines Elementes oder einer Verbindung von den energetischen Übergangs-

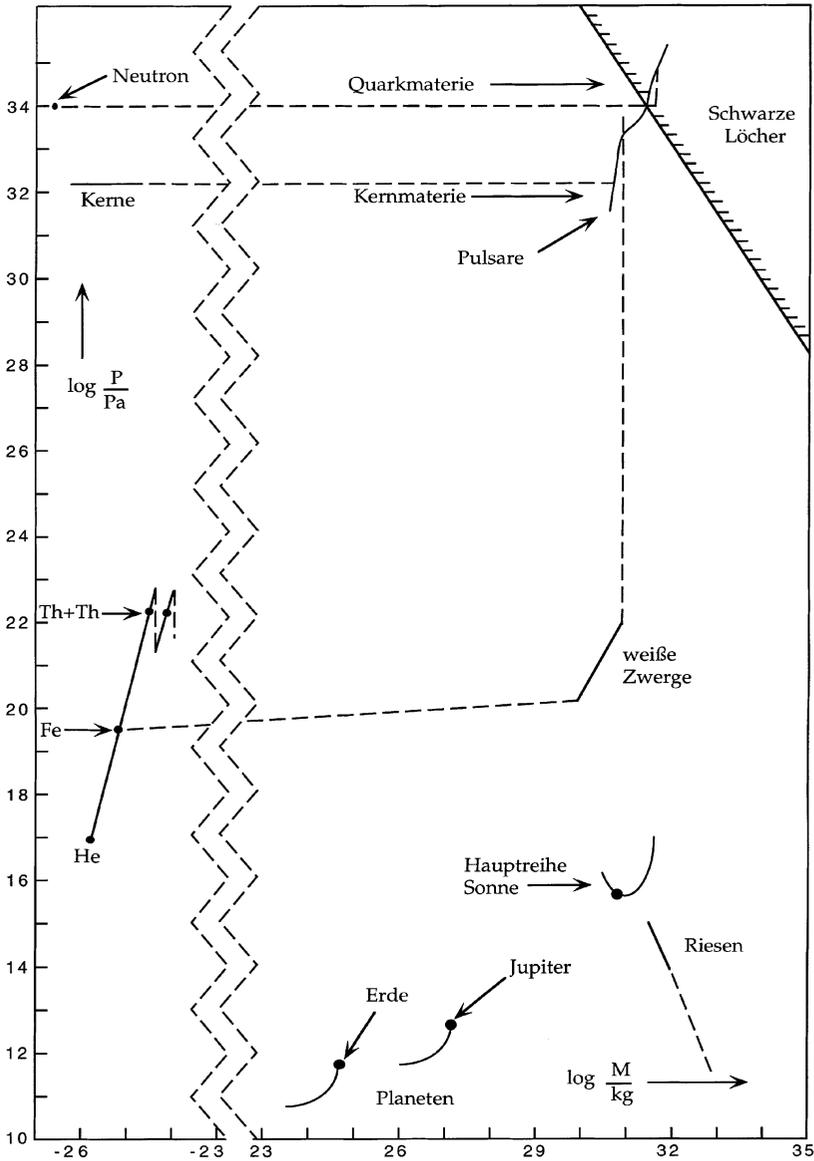


Abb. 4. Masse-Druckdiagramm. Die Masse  $M$  erstreckt sich über 62, der Druck  $P$  über 26 Größenordnungen. Trotzdem sind nur Gravitation, starke und elektromagnetische Kräfte von Bedeutung. Der Druck ändert sich kaum bei den Quarks zwischen einem Baryon und der Quarkmaterie in einem Schwarzen Loch, bei den Nukleonen zwischen den Atomkernen und den Pulsaren, bei den Elektronen zwischen Zentrum von Eisenatomen und dem Zentrum eines weißen Zwergsterns. Bei Planeten und Sternen sind immer Gesamtmasse und Gravitationsdruck im Mittelpunkt angegeben

möglichkeiten jener Elektronen ab, die nicht zu fest an die Atomkerne gebunden sind. Schrödingergleichung, Pauliprinzip sowie die Coulombkraft zwischen Elektronen und Kern ergeben für gebundene Elektronen eine Schalenstruktur der Atome und das Periodensystem der chemischen Elemente. Die drastischen Unterschiede in den chemischen Eigenschaften sind bloß durch kleine Unterschiede in den Besetzungszahlen bedingt. So fehlt in den Halogenen (Fluor, Chlor, ...) bloß ein Elektron zu einer vollen Schale, während die Alkaliatome nur ein Elektron in einer neuen Schale des elektrisch neutralen Atoms haben. Die Edelgase (Helium, Neon, ...) sind durchsichtig und chemisch träge, weil in den neutralen Atomen die Schalen abgeschlossen sind und mögliche Elektronanregungen mit einem zu großen Energieaufwand verbunden wären. Abbildung 5 zeigt die Elektron-Besetzungszahlen in den Schalen elektrisch neutraler Edelgasatome mit punktförmigen Atomkernen. Dabei verschwinden die innersten Schalen für  $Z > 137$ ,  $Z > 274, \dots$ . Bei räumlich ausgedehnten und sphärisch symmetrischen Kernen brechen die Zustände stärkster Bindung erst bei höheren  $Z$ -Werten zusammen. Empirisch sind einerseits keine Edelgase mit  $Z > 86$  bekannt, andererseits kann das Periodensystem über Neutron und Antineutron ( $Z = 0$ ) hinaus bloß bis zum Antiwasserstoff ( $Z = -1$ , gebundenes System von Antiproton und positivem Elektron) realisiert werden. Für die Edelgase der Antimaterie (Antihelium, Antineon, ...) sind aber die gleichen Besetzungszahlen und auch die gleichen Spektren zu erwarten wie für die vertrauten Edelgase. Damit ist Demokrits Konzept nicht bloß bestätigt, sondern kann auf einen stark erweiterten Bereich der materiellen Wirklichkeit ausgedehnt werden.

- (e) Das Hauptargument gegen den Atomismus hat sich in den letzten 2400 Jahren relativ wenig geändert. Es betrifft die Eigenständigkeit und die Zielstrebigkeit (Teleologie) der Lebensprozesse, der Literatur, des Geisteslebens, der Willensfreiheit und der Ethik gegenüber strengen Naturgesetzen für die atomaren Vorgänge und gegenüber zufälligen Konfigurationen, die sich durch atomare Stöße und Einfangprozesse ergeben. Trotz aller empirischen Belege für den antiken Atomismus mußte dieser wegen des genannten Hauptarguments 2000 Jahre lang ruhen. Mit der Renaissance des Atomismus im 17. und 18. Jahrhundert kehrten auch die alten Gegenargumente wieder. Die Wunderapologeten vor hundert Jahren haben bei den sogenannten Wundern gegen die Natur zum Zeichen und zur Beglaubigung eines göttlichen Eingriffs so wie Lukrez

N																	
1	K	-2	-2	-2	-2	0	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
2	L	-8	-8	-8				8	8	8	8	8	8	4	4	4	0
3	M	-18	-8						8	18	18	18	18	14	14	14	6
4	N	-8							8	18	32	32	28	28	28	20	
5	O									8	18	32	50	46	46	38	
6	P										8	18	50	50	68	68	
7	Q											8	18	32	50	68	
8	R												8	18	32	50	
9	S													8	18	32	
10	T														8	18	
11	U																8
	Z=	-36	-18	-10	-2	0	2	10	18	36	54	86	118	172	200	268	308
		$\overline{\text{Kr}}$	$\overline{\text{Ar}}$	$\overline{\text{Ne}}$	$\overline{\text{He}}$	$\overline{\text{n}}, \text{n}$	$\text{He}$	$\text{Ne}$	$\text{Ar}$	$\text{Kr}$	$\text{Xe}$	$\text{Rn}$					

Metamorphosen der Materie

Abb. 5. Edelgase im Periodensystem der Antimaterie ( $Z < 0$ ) und Materie ( $Z > 0$ ). Elektronenbesetzungszahl in den einzelnen Schalen (Hauptquantenzahl N) als Funktion der Ordnungszahl (Protonenzahl Z)

Abweichungen von den Naturgesetzen postuliert, wie wenn diese weniger göttlich wären als deren Verletzung.

Vitalisten und Neovitalisten machen Anleihen beim Neuplatonismus, obwohl dessen Begriffe innerhalb neuzeitlich naturwissenschaftlicher Kausalitätskategorien nicht definiert sind und keinen Sinn ergeben. So führt Hans Driesch (1867–1941) wieder die “Entelechie” als ein Lebens-, Form- und Wirkprinzip ein, das, wie der Name sagt, auch Zweck und Ziel in sich enthält. Henri Bergson (1859–1941) postuliert, um die Eigenständigkeit des Lebens zu retten, einen eigenen “*élan vital*” in einer überzeugenden Sprache, die ihm zwar den Literaturnobelpreis bringt, aber die miteinander vermengten Begriffe nicht entwirren kann. Schließlich versucht Pascual Jordan (1902–1980), Heisenbergs Unschärferelationen von 1927 im Rahmen seiner Verstärkertheorie so zu interpretieren, daß durch den freien Willen innerhalb quantenmechanischer Unbestimmtheiten ein biochemisch wichtiges Enzymmolekül aktiviert wird, das so viele Reaktionen katalysiert wie notwendig sind, um makroskopisch beobachtbare Vorgänge und Willenshandlungen zu ermöglichen.

Die Verstärkertheorie und analoge Vermittlungsversuche sind aus fünf sehr unterschiedlichen Gründen entschieden abzulehnen:

- (ea) Die Quantentheorie ist ebenso wie die klassische Physik eine deterministische Theorie, weil die Zustandsfunktion durch die Schrödingergleichung vollständig bestimmt ist, wenn nur diese Funktion zu einem Zeitpunkt im ganzen Raum vorgegeben wird. Da das *de facto* eine Vorgabe von unendlich vielen Anfangsdaten bedeutet, verliert der Determinismus an Bedeutung. Die Unschärferelationen haben zur Folge, daß die vollständige Kenntnis eines Zustandes klassisch und quantenmechanisch sehr Unterschiedliches bedeuten.
- (eb) Wenn Willenshandlungen mit Hilfe von aristotelischen oder neuplatonischen Ursachen, die biochemischen Prozesse aber mit Hilfe von Katalyse und einer Verschiebung von Reaktionsgleichgewichten beschrieben werden, so lassen sich diese bei den heterogenen Begriffswelten nicht in sinnvollen Sätzen kombinieren.
- (ec) Zufall und zufällige Anfangswerte sind nichts Absolutes, sondern nur in Bezug auf bestimmte Gesetzmäßigkeiten definiert, die jene nicht fixieren, sondern offen lassen. Die besondere Kombination der Anfangsdaten kann daher Gegenstand anderer Gesetzmäßigkeiten sein, die allerdings mit den vorgegebenen Gesetzen nicht in Widerspruch stehen dürfen.

- (ed) Auch statistische Gesetze sind strenge Gesetze und lassen keinen Freiraum für Abweichungen offen. Außerdem sind Schwankungen von Zustandsgrößen ganz ohne Quantentheorie bereits von der Thermodynamik her bekannt; sie sind aber einer fehlerfreien Übertragung von genetischer Information gerade nicht förderlich. Die Quantenphysik wirkt sich in einer Richtung aus, die den Überlegungen Jordans genau entgegengesetzt ist: Durch die Richtungs- und Energiequantelung von Radikalen in den Molekülen chemischer Verbindungen wird die räumliche Struktur von Molekülen stabilisiert. Dadurch kann genetische Information gespeichert und übertragen werden, ohne daß die Energieschwelle für Strukturänderungen durch thermisches Rauschen überschritten wird. Nur weil chemische Bindungen und die Bindung über Wasserstoffbrücken weder zu fest noch zu locker sind, werden eine relative Stabilität der Arten, eine Verdoppelung der genetischen Information, Synthese und Umwandlung von Proteinen möglich. Deshalb ist die strenge Gültigkeit der chemisch-physikalischen Naturgesetze notwendige Voraussetzung und gerade kein Hemmschuh für die Entfaltung des Lebens.
- (ee) Die wichtigste Folge der quantenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten ist die Tatsache, daß es bei atomaren Wechselwirkungen keine reinen Zufallsverteilungen gibt. Nicht alle Endzustände sind gleich wahrscheinlich, sondern definierte Strukturen werden bevorzugt. Ein angeregtes Atom oder Molekül zerfällt nicht in ein Kontinuum, sondern in einen von endlich vielen Energiezuständen. So wie bei den Attraktoren in der Chaostheorie, so evolvieren auch in Physik, Chemie und Biologie aus einem breiten Band von unterschiedlichen Anfangswerten die einzelnen Systeme zu wohldefinierten Strukturen.

## 6. Schluß

Aus heutiger Sicht läßt sich das Zusammenspiel von Gesetz, Zufall und Struktur ganz ohne Apologetik und Hilfsannahmen sehr positiv sehen. Nicht durch äußere und systemfremde Formprinzipien, die wie ein *deus ex machina* gewaltsam herbeigerufen werden, sondern durch die besondere Art der Naturgesetze werden Strukturen in Astronomie, Chemie, Biologie und Kultur nicht bloß möglich gemacht, sondern auch stabilisiert.

Masse, Größe und Oberflächentemperatur von Sternen sind nicht zufällig verteilt, sondern hängen von den Gleichgewichtsverhältnissen bei Partialdrücken, Energieerzeugung und Energietransport ab. Durch das Gleichgewicht von Ernährung und Atmung sind gewisse Formen

und Proportionen bei unterschiedlichen Tierarten bevorzugt, wie sich auch anhand klimatisch bedingter Variationen belegen läßt. Die vielfältigen Metamorphosen der Materie und die Mannigfaltigkeit stationärer und quasistationärer Systeme sind durch die wechselseitige Feinabstimmung der Naturgesetze und der Naturkonstanten möglich, strukturiert sowie in ihrer relativen Stabilität und Kontinuität garantiert. Es wäre also völlig verfehlt, die Naturgesetze als Hindernis und Bedrohung von Leben und Geist zu sehen, weil nur durch sie eine Materie mit Vielfalt, Struktur und Stabilität möglich und ein Kommunikationsraum mit der notwendigen Kontinuität geschaffen wird. In mehr als zehn Milliarden Jahren hat die Evolution des Kosmos erst gezeigt, zu welchen makro- und mikroskopischen Formen und Facetten die Gesetzmäßigkeiten der Fundamenteilchen führen können.

Der vorliegende Beitrag wurde im Rahmen eines Seminars am Atominstitut der Österreichischen Universitäten am 11. November 1997 vortragen. Die anschließende Diskussion kann zwar nicht wörtlich, soll aber sinngemäß wiedergegeben werden.

## 7. Diskussion

- (a) Zeitpfeil (P. Aichelburg). Wie haben sich die Atomisten mit der Tatsache auseinandergesetzt, daß die Naturgesetze keine Zeitrichtung bevorzugen, während in den Naturphänomenen eine solche Richtung ausgezeichnet wird?

Die antiken Atomisten haben weder die Entropie noch ihre monotone zeitliche Zunahme in abgeschlossenen Systemen gekannt. Daher hat sich ihnen das Problem des Zeitpfeils nicht gestellt. Selbst Albert Einstein hat im Rahmen der Gravitationstheorie bei seinen statischen Weltmodellen den Zeitpfeil ignoriert. Erst der Hubble-Effekt und die allgemeine Expansion des Universums haben den Zeitpfeil drastisch vor Augen geführt. Die heutigen Atomisten können den Zeitpfeil am Masse-Druckdiagramm (Abb. 4) ablesen: Die Entwicklung geht eindeutig von den kondensierenden Riesensternen über die Hauptreihe zu den Weißen Zwergen, den Pulsaren und den Schwarzen Löchern. Obwohl der Zeitpfeil bei den Fundamenteilchen bloß peripher (bei speziellen schwachen Wechselwirkungen) aufscheint, sind durch die Expansion des Universums die Anfangs- und Randbedingungen für die kosmische Materie so, daß der Zeitpfeil nur die gegenwärtige Richtung haben kann.

- (b) Monaden (H. Klima): Hat nicht Leibniz durch die Unterscheidung in die Monaden für den menschlichen Geist und in die Atome für

die (naturgesetzlich bestimmte) Außenwelt eine tragfähige Basis für eine Lösung des Problems der Willensfreiheit geschaffen?

An sich sind Monade und Samenteilchen Synonyme für das Atom gewesen. Die Monaden wurden von dem Pythagoräer Ekphantos von Syrakus (520–460 v. Chr.) eingeführt (Abb. 1). Seine Monaden unterlagen aber nicht mechanischen zwischenatomaren Kräften, sondern wurden durch eine göttliche Kraft (*theia dynamis*) bewegt. Dieser Monadenbegriff dürfte über Giordano Bruno (1548–1600) und Lady Anne Finch Conway (1631–1679) auf Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) gekommen sein. Leibniz lehnte die Atome Demokrits generell und eine naturgesetzliche Wechselwirkung zwischen den Monaden ebenfalls ab. In Anlehnung an die Ideen des Ekphantos wird bei Leibniz jede Monade in ihrem Gesamtkonzept direkt von Gott gelenkt und bildet so jeweils ein eigenes Universum. Monaden wirken nicht aufeinander ein (sie haben keine Fenster), sondern es gibt zwischen den Monaden eine prästabilisierte Harmonie, die uns als Kausalität und als Harmonie des Universums erscheint. Dieses Weltbild erinnert an Parmenides und Zeno von Elea; es hat nicht Schule gemacht und bietet eine Lösung des Leib-Seeleproblems an, die selbst protestantischen Pietisten etwas verkrampft und schizophran erschienen sein dürfte.

- (c) Willensfreiheit (O. Hittmair): Die historisch gewordenen Argumente gegen den Atomismus und für die Willensfreiheit sind überzeugend entkräftet worden. Wie ist aber dann das Problem der Willensfreiheit aus heutiger Sicht zu beurteilen?

Die Willensfreiheit dürfte zumindest so, wie sie gegenwärtig formuliert wird, ein Scheinproblem sein, weil psychologische und ethische Aspekte unkritisch vermengt werden, obwohl sie aus sehr heterogenen Begriffssystemen stammen. Eine aktive aristotelische oder neuplatonische Wirkursache steht im Rahmen des Hylemorphismus einer weitgehend eigenschaftslosen Materie gegenüber, die innerhalb einer einsinnig gerichteten Wirkkette geformt, verändert und strukturiert wird. In dieser Kausalkette gibt es keine Rückwirkung und daher auch kein Problem.

Im Rahmen der neuzeitlichen Kausalitätskategorien ist die Materie mikro- und makroskopisch geformt. Bis zu den Atomen und Elementarteilchen gibt es Eigenzeiten und eigengesetzliche Bewegungen, aber auch eng vernetzte Wechselwirkungen, die es gar nicht gestatten, einzelne Komponenten als Wirkursachen und Wirkungen im herkömmlichen Sinn herauszulösen und zu isolieren. Vielmehr muß ein geschlossenes System mit all seinen Komponenten, mit seinen Regel- und Funktionskreisen als Funktion der Zeit und in seinen Entfaltungsmöglichkeiten

untersucht werden. Weil die geschlossenen biochemischen, physiologischen und neuralen Funktionskreise für Lebewesen charakteristisch und wesentlich sind, würde gerade ein Aufschneiden der Kreise in klassische Kausalketten lebensnotwendige Aspekte beseitigen und außer Acht lassen. Daher ist für das intakte Lebewesen die Fragestellung nicht definiert; für das mißhandelte Lebewesen kann die Freiheit auch nicht garantiert werden. Die Willensfreiheit ist somit weder innerhalb der klassischen noch innerhalb der neuzeitlichen Kausalitätskategorien ein Problem; sie wird aber zum Paradoxon und zum unlösbaren Scheinproblem, wenn eine neuplatonische Seele ein chemisches Reaktionsgleichgewicht von eigengesetzlichen Atomen und Molekülradikalen verschieben und zu einem ethischen Ziel hin steuern soll.

### Literatur

Wertvolle Quellen für historische Zusammenhänge bilden die folgenden beiden Bücher:

- (a) Simon Blackburn, *The Oxford Dictionary of Philosophy*, Oxford University Press, Oxford 1994.
- (b) Alfred Stückelberger, *Antike Atomphysik*, Tusculum-Bücherei, Heimeran Verlag, München 1979.

**Anschrift des Verfassers:** Prof. Dr. G. Eder, Institut für Kernphysik der Technischen Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8–10, A-1040 Wien