

Atome, Teilchen, Teilbarkeit

Hartmann Römer

”Denken Unterwegs”, H.-D. Ebbinghaus, G. Vollmer hrsg, Edition
Universitas, S.Hirzel Verlag, Stuttgart 1992

1. Die Atomhypothese

Der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger **Richard Feynman** schreibt am Anfang seines Lehrbuches zur Einführung in die Physik (ich übersetze) ”Wenn in einer globalen Katastrophe alle naturwissenschaftlichen Kenntnisse ausgelöscht würden und nur ein einziger Satz an die nächste Generation weitergereicht werden dürfte, welcher Satz würde die meiste Information in den wenigsten Worten enthalten? Ich glaube, es wäre die Atomhypothese oder, besser gesagt, die Atomtatsache: Alle Dinge bestehen aus **Atomen**, kleinen Teilchen, die sich in beständiger Bewegung befinden, sich anziehen, wenn sie ein wenig voneinander entfernt sind, und sich abstoßen, wenn sie in direkten Kontakt geraten”.

Die große Mehrheit aller Physiker würde - ebenso wie ich - dieser Aussage zustimmen. Ist es nicht seltsam, dass fast dieselbe Atomhypothese schon im fünften Jahrhundert vor Christus von dem griechischen Philosophen **Demokrit** von Abdera und noch vorher von seinem oft genannten und wenig bekannten Vorgänger **Leukipp** ausgesprochen wurde, obwohl es bis zum Beginn dieses Jahrhunderts dauerte, bis das gesammelte Tatsachenmaterial dazu zwang, die Existenz von Atomen als Realität anzunehmen?

Allen Varianten der Atomtheorie sind folgende Vorstellungen gemeinsam:
Atome sind Urbausteine aller Dinge und als solche

- sehr klein und unsichtbar -
- hart und unteilbar -
- in dauernder Bewegung begriffen.

Durch ihre Bewegung und Umlagerung, durch Mischung und Entmischung rufen sie alle Vorgänge und Veränderungen in unserer Welt hervor.

In der Antike wurde die Atomhypothese besonders in der epikuräischen Schule weiterentwickelt; es widersprach ihr **Aristoteles**, und später wurde sie von den Kirchenvätern, etwa von Laktanz und Augustinus, abgelehnt und bekämpft. Gerade durch diese Polemik hat sich aber eine gewisse Kenntnis der Atomtheorie das ganze Mittelalter hindurch erhalten. Eine Neubelebung erfuhr die Atomvorstellung, seitdem Poggio im Jahre 1417 eine Handschrift des Epikuräers **Lukrez** auffand und damit eine ausführliche Darstellung der Atomtheorie aus erster Hand zugänglich wurde.

Dennoch dauerte es noch fast fünf Jahrhunderte bis sich die Atomvorstellung endgültig durchsetzte.

Zwar hatte der Atombegriff in der kinetischen Gastheorie und in der Chemie schon länger seinen festen und unentbehrlichen Platz, aber Atome galten doch eher als fiktive Rechengrößen und nicht als schlichte Realität. Noch **Max Planck**, einer der Väter der Quantentheorie, lehnte bis zur Jahrhundertwende das Atomkonzept, von dem er selbst in seiner täglichen theoretischen Arbeit Gebrauch machte, als unbeweisbare Spekulation ab. Die Annahme, dass Atome ganz real, "platterdings" existieren, wäre ihm wohl als unerlaubte Ausweitung und Vergröberung einer sehr feinen und nützlichen Hypothese erschienen.

Inzwischen hat sich die Lage von Grund auf geändert:

Es gibt viele Experimente, in denen einzelne Atome greifbar werden, man kann ohne Übertreibung sagen, dass Atome ebenso real sind wie Steine und Bäume. Es kann kein Zweifel mehr daran bestehen, dass etwa ein Tropfen Wasser aus ungefähr einer Trilliarde Teilchen besteht, von denen jedes einen Durchmesser von einem Zehnmillionstel Millimeter hat, und aus deren gegenseitiger Anziehung sich die Eigenschaften von Wasser bis in Einzelheiten hinein verstehen und berechnen lassen.

Wahr bleibt, dass sich Atome wegen ihrer Kleinheit unter alltäglichen Bedingungen kaum beobachten lassen. Antike Autoren, etwa Plutarch, sagen, sie seien nicht mit den Sinnen sondern nur mit dem Verstand wahrnehmbar. Wie hätten sie auch eine solche künstliche Erweiterung unserer Sinne durch Instrumente vorausahnen können, wie sie in unserer Zeit Wirklichkeit geworden ist?

Die Schwierigkeit, Atome direkt zu sehen, ist sicher nicht der einzige Grund

dafür, dass man so lange ihre reale Existenz bestritt. Wir wollen hier einigen in diesen Zusammenhang naheliegenden Fragen nachgehen:

- Welche Gründe gaben schon so früh zu der Atomhypothese Anlass und was ist ihre Leistung zur Erklärung der Natur?
- Welche inneren Schwierigkeiten der Atomvorstellung verhinderten so lange ihre vollständige Anerkennung?
- Wie stellen sich Argumente und Gegenargumente zur Atomtheorie aus der Sicht der heutigen Physik dar?

2. Argumente für Existenz und Unteilbarkeit der Atome

a) Das Volle und das Leere

Ein Antrieb zur Entwicklung der Atomvorstellung war sicher das Bedürfnis nach einer befriedigenden Theorie der Bewegung und Veränderung. Leukipp und Demokrit hatten sich mit der Lehre von Sein auseinanderzusetzen, wie sie etwa **Parmenides** von Elea vertrat:

Das Sein ist eines, zusammenhängend, unverletzlich unverminderbar und unveränderlich "wie eine Kugel", und deshalb ist jede Veränderung, jedes Werden, nur Schein. Um diesem Schluss zu entgehen, lag es nahe, ein Nicht-seiendes (mä on), ein Leeres (kenon) zu fordern, in dem das Seiende sich bewegen, seine Lage ändern konnte.

Hören wir, wie Aristoteles diesen Gedankengang in seinem Bericht über Leukipps Vorstellungen von der Materie wiedergibt: [1]

"Einige ältere Philosophen waren nämlich der Auffassung, das Seiende müsse Eines sein und unbeweglich, denn der leere Raum existiere nicht; eine Bewegung aber sei nicht möglich ohne die Existenz eines besonderen leeren Raumes; und ferner könne es keine Vielheit geben, da nichts Trennendes da sei....Leukipp dagegen glaubte, eine Erklärung gefunden zu haben (.....). Denn was im eigentlichen Sinne des Wortes ist, das ist nach ihm das vollkommene Volle. Aber ein solches vollkommen Volles kann nicht eines sein, sondern es muss der Zahl nach unbegrenzt viele, wegen der Kleinheit ihrer Masse unsichtbare Bestandteilchen geben. Diese bewegen sich im leeren Raum - ein solcher Raum existiert nämlich nach ihm - und bewirken durch ihr Zusammentreten das Entstehen, durch ihre Auflösung das Vergehen."

Epikur sagt zu demselben Problem:[2]

"Das All besteht aus Körpern und aus dem leeren Raum; denn dass es Körper gibt, bezeugt die Wahrnehmung selbst an allem (.....). Wenn es aber nicht auch jene andere Komponente gäbe, die wir als "Leeres", "Raum" oder "unberührbares Wesen" bezeichnen, hätten die körperlichen Dinge keinen Platz, wo sie sein und worin sie sich bewegen könnten, wie wir sie sich bewe-

gen sehen. Außer diesen beiden Komponenten kann aber nichts Erfassbares oder dem Erfassbaren Analoges auch nur erdacht werden,..."

Diese Zweiheit Raum-Materie ist grundlegend für alle antiken Atomtheorien. Sie ist zugleich der Hauptgrund, weshalb Aristoteles, für den die Vorstellung eines existierenden Leeren, Nicht-Seienden unannehmbar war, sich gezwungen sah, die atomistischen Vorstellungen anzugreifen und eine ganz andersartige Theorie der Bewegung und Veränderung zu entwickeln. Der Hauptstrom der europäischen Philosophie ist bekanntlich in dieser Frage Aristoteles und nicht den Atomisten gefolgt.

b) Die Erklärungsleistung der Atomtheorie

Die Vorstellung von bewegten Atomen als den Grundbestandteilen der Materie erschließt sehr anziehende Denk- und Erklärungsmöglichkeiten. Gerade diese Erklärungsleistung ist ein starkes Argument zugunsten der Atomhypothese.

i) Zunächst einmal ist so, wie schon beschrieben, eine Theorie der Bewegung und Veränderung geschaffen. Demokrit spricht vom Wirbel (dinos) als dem wirkenden Prinzip. Durch Bewegung, Mischung und Entmischung werden sämtliche stofflichen Erscheinungen bewirkt. Hierin enthalten ist vor allem auch eine genauere Theorie der stofflichen Umsetzung durch Umlagerung von Atomen, ein Vorgriff auf die heutige Chemie.

ii) Die Vielheit der Qualitäten lässt sich auf einige wenige primäre Qualitäten zurückführen, nämlich auf Form, Lage und Anordnung der Atome. (Bei Epikur kommt als primäre Qualität der Atome noch ihre Masse hinzu.) Demokrit glaubt hierbei an die Existenz unendlich-vieler verschiedener Atomformen (da alle möglichen Formen gleich wirklich sein sollten). Diese Vorstellung wurde von Aristoteles als störend aber unwesentlich angesehen und von Epikur fallengelassen. Nach Epikur gibt es zwar sehr viele verschiedene Atomformen aber doch insgesamt nur eine endliche Anzahl. Sein Argument ist folgendes: Bei gegebener Größe lassen sich durch Modifikation der Form nur endlich-viele Atomformen konstruieren. Also müsste es, wenn es unendlich-viele verschiedene Atome gäbe, auch beliebig große Atome geben, was offensichtlich falsch ist, da wir keine Atome sehen. Da nach seiner Auffassung die Welt unendlich ist, gibt es dann von jeder Atomsorte unendlich-viele Exemplare. Uns erscheint dieser Schluss Epikurs fehlerhaft, da er eine diskrete, diskontinuierliche Mannigfaltigkeit von möglichen Atomformen annimmt und damit einen Teil des zu Beweisenden schon voraussetzt. Wir werden später auf das sehr ernsthafte Problem, warum von den unendlich-vielen denkbaren Atomformen nur wenige realisiert sind und

warum die kontinuierlich-vielen Zwischenformen fehlen, die sich durch kleine "Verbiegungen" erzeugen lassen sollten, noch zurückkommen.

Festzuhalten bleibt jedenfalls der Gedanke der Sekundarität fast aller Sinnesqualitäten, der mit der Atomtheorie verbunden ist. Demokrit sagt in dem wiederholt überlieferten Zitat, dem vielleicht einzigen, das wörtlich so von ihm stammt:

"Nur der Meinung nach gibt es sauer, nur der Meinung nach bitter, warm, kalt, nur der Meinung nach Farbe, in Wirklichkeit gibt es nur Atome und leeren Raum". Dies ist bis heute das Grundprogramm des (problematischen) physikalischen Reduktionismus.

Gerade dieser Aspekt der Reduktion der Qualitäten war für die Epikuräische Schule besonders anziehend in ihrem - anachronistisch gesprochen - aufklärerischen Bestreben, den Geist durch Klarstellung der wahren Ursachen seiner Wahrnehmungen und durch Befreiung von falscher Furcht, wie sie durch "Ammenmärchen" über die Natur hervorgerufen wird, in den Zustand unverletzlicher Festigkeit und Ruhe zu versetzen.

Eine weitere Erklärungsleistung der Atomvorstellung war eine Theorie der Sinneswahrnehmung durch "Ausströmung" von Atomen. Besonders bei Geruchswahrnehmungen, aber auch beim Sehen sollen Teilchen ausgesandt werden und auf die Sinnesorgane wirken. Wegen der Feinheit der Sinneswahrnehmung können die ausgesandten Teilchen nur sehr klein sein. Nach heutiger Kenntnis beruhen allerdings nur die Geruchswahrnehmungen direkt auf Übermittlung von Teilchen.

Nach der antiken Atomtheorie erklären sich die Wechselwirkungen und Kräfte zwischen den Atomen durch direkten Kontakt beim Zusammenstoß. In der Geschichte der Physik war dieser Gedanke eher hinderlich. Erst viel später war man bereit anzunehmen, dass die Atome auch aus der Entfernung Kräfte aufeinander ausüben. Die Annahmen von Atomen und Kräften zwischen ihnen nach den Gesetzen der Newtonschen Mechanik wurden dann allerdings zu den Grundbestandteilen des mechanistischen Weltbildes.

c) Zur Beständigkeit und Unteilbarkeit der Atome

Ganz durchgängig werden die Atome von allen Vertretern der Atomtheorie als unteilbar angenommen. Bekanntlich bedeutet Atom, griechisch atomos, soviel wie "unteilbar", "unzerschneidbar". Dieses Wort wurde zunächst Begriffen wie "Körper" als Adjektiv beigelegt und setzte sich erst später als allgemeine Bezeichnung für die kleinsten unzerstörbaren Teilchen durch, die wegen ihrer Winzigkeit oder wegen ihrer Härte unteilbar gedacht wurden.

Welche Überlegungen führten nun dazu, die kleinsten Teilchen als unteilbar anzunehmen?

i) Zunächst wären die kleinsten Teilchen, wenn sie weiter teilbar wären, nicht wirklich elementar; man sollte dann eher ihre Bruchstücke als Atome bezeichnen.

ii) Die Beständigkeit der Materie: Wenn Atome teilbar oder abnützbar wären, dann wäre, unendliche Zeit vorausgesetzt, alles schon zu "Staub" zerfallen. Selbst in endlicher Zeit müssten alle Stoffe ständig ihre Eigenschaften durch Abnutzung ändern. In sehr klarer Form taucht dieses Argument, das auch heute noch überzeugt, bei Newton auf, wenn er darauf hinweist, dass die Eigenschaften von Wasser von jeher dieselben sind. Auch die Umkehrbarkeit von Naturvorgängen, etwa von chemischen Umsetzungen, ist ein Hinweis auf die Beständigkeit der Atome, da deren Auflösung unumkehrbar sein sollte.

iii) Es gibt harte und weiche Stoffe, wobei sich Härte und Weiche aus dem Grad der Festigkeit des Zusammenhaltes der Atome erklären. Wären Atome weich, so könnte es nur weiche Stoffe geben.

iv) Teilbarkeit ist nur möglich längs gewisser Fugen, also durch Vergrößerung von Zwischenräumen. Da aber die Atome das absolut Volle sind und dessen absolutes Gegenteil, den leeren Raum, nicht enthalten, müssen sie absolut hart und unteilbar sein.

v) Wenn Atome teilbar wären, so wäre nicht einzusehen, warum sich ihre Bestandteile nicht weiter teilen ließen und so fort bis ins Unendliche. Dieser drohende Regress ins Unendliche wurde wohl als stärkstes Argument für die Unteilbarkeit der Atome angesehen.

Einige dieser Argumente, zumal das letzte, legen übrigens nicht nur die Unteilbarkeit sondern auch die Existenz von Atomen nahe.

3. Begriffliche Schwierigkeiten der klassischen Atomvorstellung

Gerade das Argument des unendlichen Regresses bei fortgesetzter Teilbarkeit nahm Aristoteles sehr ernst, obwohl er ja die Atomvorstellung ablehnte. Die Beweisführung Demokrits, den er schätzte und dem er ausdrücklich sachgerechtes Vorgehen bescheinigte, fasste er so zusammen: [3]

”Es hat nämlich seine Schwierigkeit, wenn jemand die These aufstellt, ein Körper sei auch eine Größe, die durch und durch teilbar ist, und diese Teilung könne verwirklicht werden. (....). Wenn etwas ins Unendliche teilbar ist, dann wird nichts Unmögliches geschehen sein, wenn es tatsächlich geteilt wäre, nicht einmal dann, wenn es ins Millionenfache geteilt wird; freilich wird eine solche Teilung wohl kaum jemand verwirklichen. Wenn nun also ein Körper absolut teilbar ist, nehmen wir einmal an, die Teilung sei tatsächlich durchgeführt: Was bleibt dann dabei übrig? Eine Größe? Dies ist nicht möglich; sie wäre ja etwas, was nicht geteilt worden wäre, während doch der Körper absolut teilbar war. Aber auch wenn kein Körper und keine Größe übrigbleibt, eine Teilung (ins Unendliche) jedoch besteht, dann bestünde die Materie entweder aus Punkten und würde sich aus ausdehnungslosen Bestandteilen zusammensetzen, oder aus überhaupt nichts, so dass sie aus nichts entstehen und sich zusammensetzen würde; das ganze All wäre somit nichts anderes als ein Scheingebilde. Ebenso unsinnig wäre es, wenn (ein Körper) aus Punkten bestünde: er hätte dann keine Ausdehnung; denn immer, wenn diese Punkte sich berührten und miteinander eine Einheit bildeten, würden sie das Ganze um nichts größer machen. Wenn nämlich das Ganze in zwei oder mehr Teile geteilt würde, wäre es um nichts kleiner oder größer als vorher, so dass selbst wenn alle Punkte zusammengesetzt würden, sie keine Ausdehnung bewirken könnten.”

In anderen Worten: Die Vorstellung ins Unendliche fortsetzbarer Teilbarkeit ist unhaltbar, da die kleinsten Teile, solange sie ausgedehnt sind, noch teilbar gedacht werden können; wenn sie nicht ausgedehnt sind, das Ganze, Ausgedehnte nicht aus ausdehnungslosen Punkten zusammengesetzt werden kann. Es ist dies letztlich die Aporie des Zenon, die bis heute rätselhaft bleibt: Eine Gerade oder eine Zeitstrecke besteht aus Punkten, es ist jedoch nicht möglich, sich das Kontinuierliche aus diskreten Punkten zusammengesetzt zu denken. Man kann noch einen Schritt weiter gehen: Schon der Begriff von Größe und Ausdehnung gerät ins Wanken, wenn man fortgesetzte Teilbarkeit annimmt. So führt **Lukrez** aus: [4]

”Wenn es außerdem nicht etwas Kleinstes gäbe, bestünden auch die winzigen Urteilchen aus unbegrenzt vielen Teilen, da jede Hälfte eines Teiles immer wieder halbiert werden könnte und nichts (einen solchen Teilungsvorgang) aufhielte. Was wäre dann noch der Unterschied zwischen dem größten und dem kleinsten Ding? Keiner mehr! Denn wenn auch die Gesamtheit aller Dinge noch so unbegrenzt ist, würden doch auch die kleinsten Bestandteile aus ebenso unbegrenzt vielen Teilen bestehen.”

Die Vorstellung unendlicher Teilbarkeit führt also zu Schwierigkeiten und legt die Forderung nach unteilbaren Grundeinheiten nahe. Andererseits ergibt sich aber auch ein Dilemma, wenn man die Überlegungen über Größe und Teilbarkeit auf die Grundeinheiten selbst anwendet.

- Wenn Atome ausgedehnt sind und seien sie auch noch so klein, warum sind sie dann nicht wenigstens in Gedanken teilbar?

- Wenn sie keine Ausdehnung haben, wie können sie sich dann in ihren Formen unterscheiden und wie kann Ausgedehntes aus ihnen zusammengesetzt werden?

Hier liegt also die Schwierigkeit eines Begriffes ausgedehnter Gestalt besitzender Atome. **Epikur** und, in seiner Nachfolge, **Lukrez**, haben einen sehr geistvollen Ausweg vorgeschlagen: Atome sind zwar faktisch unteilbar, zugleich aber innerlich differenziert. Sie müssen aus noch kleineren, kleinsten Bestandteilen zusammengesetzt gedacht werden, aber sie sind nicht in diese kleinsten Bestandteile zerlegbar. Diese gedanklichen Urbestandteile heißen **Elachista** - oder **Minima**. Nach Simplicios war Epikur durch die Kritik des Aristoteles zu dieser Verfeinerung des Atombegriffes gezwungen. Lukrez schreibt dazu: [5]

”Ferner, da es an den (sichtbaren) Körpern ein äußerstes Minimum gibt, (das unsere Sinne noch wahrnehmen können, muss es in analoger Weise auch ein äußerstes Minimum) bei jedem Atomkörper geben, das unsere Sinne nicht mehr wahrzunehmen vermögen. Dieses Minimum besteht zweifellos ohne Teile und ist von allerkleinster Natur und existierte niemals für sich getrennt und wird es auch in Zukunft nicht können, da es selbst Teil von etwas anderem (nämlich dem Atom) ist und zwar der erste und einzige; weitere und immer weitere ähnliche solche Teile aneinandergereiht bilden dann in dichter Anordnung einen (Atom)körper. Da diese Teile für sich allein nicht existieren können, müssen sie notwendig irgendwo anhaften, wovon sie auf keine Weise losgerissen werden können.”

Hier wird also der sehr interessante und überraschende Gedanke geäußert, dass Atome zugleich einerseits ausgedehnt und innerlich differenziert und andererseits unteilbar sein können. Was aber bewirkt die tatsächliche Unteilbarkeit der Atome? Epikur muss sich hier mit einem einfachen Veto begnügen. Die moderne Physik kann, wie wir sehen werden, eine Antwort auf diese Frage versuchen.

Die Schwierigkeiten mit den Begriffen Ausdehnung und Teilbarkeit sind eine schwere Last für die Befürworter der Atomvorstellung. Andere Probleme im Zusammenhang mit dem Atombegriff sind ebenfalls, wenn auch teils nur kurz, angeklungen. Wir wollen hier eine kleine Liste von Schwierigkeiten,

mit denen die Atomtheorie zu kämpfen hat, zusammenstellen, auf die wir im nächsten Abschnitt Punkt für Punkt Bezug nehmen wollen.

- (A) Das Leere und das Volle, die Grenze zwischen beiden, Formen ausgehnter Körper.
- (B) Endlichkeit oder Unendlichkeit der Mannigfaltigkeit verschiedener Atomformen; "Formlücken" d.h. das Fehlen von Zwischenstufen zwischen verschiedenen Formen.
- (C) Das Problem der Identität von Atomen derselben Form
- (D) Nahwirkung oder Fernwirkungen, Atome und Kräfte
- (E) Probleme von Ausdehnung und Teilbarkeit.

4. Atome und Elementarteilchen

Bei jedem Vergleich der klassischen Atomtheorie mit der heutigen Physik müssen wir bedenken, dass die immer noch "Atome" benannten Bestandteile der Materie schon seit etlichen Jahrzehnten ihren Namen nicht mehr zu recht tragen. Atome bestehen aus einem winzigen **Kern** und einer etwa zehntausendmal weiter ausgedehnten **Elektronenhülle**. Mit heutigen Mitteln können die Elektronen der Atomhülle ziemlich leicht abgetrennt werden. Auch der Kern lässt sich in **Protonen** und **Neutronen** zerlegen, allerdings mit einem millionenfach größeren Aufwand an Energie. (Hierauf beruht die weitaus größere Ergiebigkeit von Kernbrennstoffen im Vergleich zu chemischen Brennstoffen.) Elektronen, Protonen und Neutronen sind mit heutigen Mitteln nicht weiter teilbar, und nach der vorherrschenden Meinung ist dies auch prinzipiell unmöglich. Sie erweisen sich als die "**Elementarteilchen**", die eigentlich erst wirklich den Namen "Atome" verdienen würden; Diese Elementarteilchen sind es also, auf die wir schauen müssen, wenn wir eine Antwort der zeitgenössischen Physik auf die klassischen Probleme der Atomtheorie suchen wollen.

Es gibt zwei deutlich unterschiedene Arten von Elementarteilchen, die sog. **Leptonen** und **Hadronen**.

Die Leptonen bilden eine kleine Gruppe von Elementarteilchen, deren wichtigster Vertreter das Elektron ist. Insgesamt sind sechs verschiedene Arten von Leptonen bekannt, darunter drei elektrisch ungeladene sog. **Neutrinos**. Zählt man die zugehörigen Antiteilchen noch hinzu, so kommt man auf insgesamt zwölf Leptonen.

Zu den Hadronen gehören außer dem Proton und dem Neutron hunderte von weiteren Elementarteilchen. Im Gegensatz zu den Leptonen weisen sie eine komplizierte innere Struktur auf. Dies und die Größe ihrer Anzahl legt die Vermutung nahe, dass die Hadronen noch nicht wirklich elementar,

sondern ihrerseits wieder zusammengesetzt seien. In der Tat nehmen die heutigen, durch Experimente vielfach bestätigten theoretischen Modelle der Elementarteilchenphysik an, dass die Hadronen aus noch kleineren Bestandteilen zusammengesetzt sind, die **Quarks** genannt werden. Sehr wahrscheinlich gibt es wieder genau sechs Quarks und sechs Antiquarks, im ganzen also zwölf.

Obwohl die Hadronen aus Quarks (und Antiquarks) zusammengesetzt sind, lassen sie sich nicht in kleinere Bestandteile zerlegen. Die Auflösung dieses Paradoxons in der Elementarteilchenphysik wird uns noch beschäftigen.

Es sind vier verschiedene Arten von Kräften bekannt, die zwischen Elementarteilchen wirken können.

Bei weitem die schwächste von allen ist die Schwerkraft, die u.a. die Erde auf ihre Bahn um die Sonne zwingt und uns durch unser Gewicht auf der Erdoberfläche festhält.

Als nächste folgt die **”schwache Kraft”**. Sie ist für gewisse radioaktive Zerfälle verantwortlich.

Der **elektromagnetischen Kraft** begegnen wir in einer Vielzahl von Erscheinungen, vom Blitz bis zur modernen Elektronik; auch die chemischen Kräfte sind elektromagnetischer Natur.

Die stärkste aller Kräfte wird **starke Kraft** genannt. Sie bewirkt den festen Zusammenhalt der Atomkerne und wirkt nur auf Hadronen, nicht aber auf Leptonen.

In den letzten Jahren ist es gelungen, eine theoretische Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Kraft zu einer **”elektroschwachen”** Kraft zu erreichen, die also jetzt nur noch als zwei verschiedene Erscheinungsweisen ein und derselben Kraft anzusehen sind. An einer vereinheitlichten Beschreibung sämtlicher Kräfte arbeiten gegenwärtig die Elementarteilchenphysiker.

Eine Sonderklasse unter den Elementarteilchen bilden die **”Austauschbosonen”** die als Vermittler der Kräfte zwischen den Elementarteilchen wirken.

Es sind dies

- für die Schwerkraft das **Graviton** (noch nicht direkt nachgewiesen)
- für die schwache Kraft die **Vektorbosonen**, die W^+ , W^- und Z heißen
- für die elektromagnetische Kraft das **Photon** und
- für die starke Kraft acht Vektorbosonen, **Gluonen** genannt.

Diese Austauschbosonen haben keine Antiteilchen, vielmehr sind sie ihre eigenen Antiteilchen.

In unserer Alltagswelt machen sich direkt nur die Schwerkraft und die elek-

tromagnetische Kraft bemerkbar. Das liegt daran, dass sie über große Entfernungen von vielen Kilometern wirken können, während die Reichweite von starken und schwachen Kräften kleiner als der Durchmesser eines Atomkerns ist.

5. Die grundlegenden Theorien der Physik des 20. Jahrhunderts

Das 20. Jahrhundert hat einen Umsturz des physikalischen Weltbildes gebracht. Vier revolutionäre Theorien sind hier zu nennen, und jede von ihnen leistet einen Beitrag zur Beantwortung der fünf Hauptfragen zum Atombegriff, die wir am Ende des vorletzten Abschnittes aufgezählt haben.

- Die **spezielle Relativitätstheorie**, im Jahre 1905 von Albert Einstein formuliert, führte zu einer grundlegenden Revision unserer Vorstellung von Raum und Zeit, die viel enger miteinander verbunden sind, als es die klassische, Newtonsche Mechanik erwarten ließ. Zu diesem Schluss zwang die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Eine besonders wichtige Folgerung der speziellen Relativitätstheorie ist die Gleichwertigkeit von Masse und Energie, die sich in der berühmten Gleichung $E = mc^2$ äußert.

- Die **allgemeine Relativitätstheorie** Einsteins aus dem Jahre 1915 beraubt die Raumzeit der klassischen Mechanik und auch der speziellen Relativitätstheorie ihrer Starre. Raum und Zeit sind nicht mehr nur das äußere von allen Vorgängen unbeeinflusste Gefäß alles physikalischen Geschehens sondern selbst Träger von veränderlichen Eigenschaften. Raum und Zeit weisen die Eigenschaft der **Krümmung** auf, und die Krümmung der Raum-Zeit wird durch die Verteilung und Bewegung der Materie bestimmt. Umgekehrt wird die Bewegung der Materie durch die Raum-Zeit-Krümmung beeinflusst. In kurzen Worten lässt sich feststellen: Die Materie "sagt" den Raum, wie er sich krümmen soll und der gekrümmte Raum sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll.

- Die **Quantenmechanik** ist etwa auf das Jahr 1926 zu datieren. Sie entstammt den Bemühungen von Werner Heisenberg, Niels Bohr, Max Born, Erwin Schrödinger, Pascal Jordan, Paul Dirac, Wolfgang Pauli und anderen; mehr als alle anderen neuen physikalischen Erkenntnisse dieses Jahrhunderts hat sie das physikalische Weltbild grundlegend verändert. Seit dem Auftreten der Quantenmechanik ist selbst die Grundvorstellung von der Natur eines physikalischen Gegenstandes nicht mehr dieselbe wie vorher. Je nach-

dem, ob man nach seinem Ort oder seiner Geschwindigkeit fragt, erscheint dasselbe physikalische Objekt bald als Teilchen, bald als Welle. Es ist dies der berühmte **Dualismus von Welle und Teilchen**. (Vergl. auch den Beitrag von M. Stöckler in diesem Band). Die Verträglichkeit dieser einander nur scheinbar widersprechenden Vorstellungen wird durch die Heisenbergsche **Unbestimmtheitsrelation** gesichert: Es ist nicht möglich, zugleich Ort und Impuls (d.h. das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) eines physikalischen Objektes scharf zu bestimmen. Vielmehr kann das Produkt von Orts- und Impulsunsicherheit eines Systems nie kleiner als eine gewisse Konstante h sein. Diese Größe h , das **Plancksche Wirkungsquantum**, ist eine fundamentale Naturkonstante, die in fast jeder quantenmechanischen Formel auftaucht und der Genauigkeit gleichzeitiger Orts- und Geschwindigkeitsmessungen eine unübersteigbare Schranke setzt.

- Die **Quantenfeldtheorie** entstand seit dem Jahre 1930 durch Anwendung der Quantenmechanik auf physikalische Systeme, die elektromagnetische Felder enthalten. Sie wurde seitdem in jahrzehntelanger Arbeit verfeinert und auf andere Kraftfelder verallgemeinert. Obwohl noch keineswegs alle Probleme der Quantenfeldtheorie geklärt sind, bildet sie doch den begrifflichen und technischen Rahmen für die Theorie der Elementarteilchen. Vielleicht das wichtigste Ergebnis der Quantenfeldtheorie ist ein vertieftes Verständnis des Welle-Teilchen-Dualismus, in dem sich zugleich Teilchen und Kräfte als zwei verschiedene Aspekte ein und derselben Sache erweisen. Zu jeder Kraft gehört ein Kraftfeld; wellenartige Zustände von Kraftfeldern stehen in einem dualen Verhältnis zu entsprechenden Teilchen, den "Quanten" der Kraftfelder. Die Kraftwirkung eines Kraftfeldes kann einerseits als Einwirkung eines Wellenfeldes, andererseits als Austausch von Feldquanten beschrieben werden. Die im vorigen Abschnitt genannten "Austauschbosonen" sind gerade die Feldquanten der fundamentalen Kraftfelder im Sinne der Quantenfeldtheorie. Die Quantenfeldtheorie liefert so ein neues Argument für die Existenz elementarer Teilchen, das unmittelbar mit der "Quantenhaftigkeit" der Quantentheorie zusammenhängt.

6. Der Begriff der elementaren Teilchen im Lichte der neueren Physik

Nun sind wir in der Lage, auf die oben aufgeworfenen Fragen zurückzukom-

men, um Antworten im Lichte der zeitgenössischen Physik zu versuchen. Wir gehen einfach Punkt für Punkt vor:

zu A): **Leeres und Volles, Form und Grenze**

- Wir haben bereits gesehen, dass in der allgemeinen Relativitätstheorie der Raum keineswegs das schlechthin Leere und Qualitätslose ist. Vielmehr ist er, zusammen mit der Zeit, Träger der Krümmungseigenschaft und steht mit der Materie in einem dynamischen Verhältnis gegenseitiger Bestimmung.

- Auch in der Sicht der Quantenfeldtheorie ist der Raum nicht leer und qualitätslos, sondern mit schwingenden und schwankenden Quantenfeldern gefüllt. Das Vakuum ist nur der Grundzustand, der Zustand niedrigster Energie, der Quantenfelder und als solcher dynamisch bestimmt und kompliziert strukturiert. Das "Vakuum" wimmelt von "Nullpunktfuktuationen" und "virtuellen Teilchen". Die Elementarteilchen bewegen sich also nicht im leeren Raum. Ihre Bewegung entspricht einer zeitlichen Veränderung von Qualitäten des Quantenfeldes. Somit gleicht die Bewegungslehre der Quantenfeldtheorie eher der Bewegungslehre des Aristoteles als den Vorstellungen Demokrits. Das Argument vom Vollen und Leeren für die Existenz von Elementarteilchen ist in der Quantenfeldtheorie gegenstandslos; sie liefert aber, wie schon erwähnt, eine eigene, ganz andersartige Begründung für das Vorhandensein elementarer Teilchen.

- Ausgedehnte Körper mit fester Gestalt und scharfer Grenze gibt es in der Quantenmechanik nicht. Um dies einzusehen, stellen wir uns versuchsweise einen kleinen, starren, harten Würfel vor als Modell eines Elementarteilchens aus der Sicht der klassischen Physik. Wenn wir nun mit den Vorstellungen der Quantenmechanik an dieses Gebilde herangehen und versuchen, etwa die Bewegung seiner Ecken zu verfolgen, so sehen wir: Ort und Geschwindigkeit einer jeden Ecke sind wegen der Unbestimmtheitsrelation der Quantenmechanik nicht zugleich scharf bestimmbar. Die Vorstellung eines starren, scharf begrenzten Gebildes verliert ihren Sinn. An ihre Stelle tritt in der Quantenmechanik die sog. **Schrödingersche Wellenfunktion**. Sie bestimmt nur die Wahrscheinlichkeit, irgendeine der Ecken an einem gegebenen Raumpunkt zu finden. Eine scharfe Grenze des Körpers gibt es nicht, vielmehr lässt sich i.a. in der Nähe eines jeden Raumpunktes jede Ecke mit einer endlichen, wenn auch kleinen Wahrscheinlichkeit auffinden. Was in dieser Wellenfunktionsbeschreibung von der Gestalt des Würfels bleibt, sind nur gröbere Züge: Sein Symmetriecharakter und etwas wie ein mittlerer

Durchmesser, nämlich der Durchmesser eines Raumgebietes, außerhalb dessen Teile des Würfels mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit, etwa kleiner als ein Promille, gefunden werden.

- Schließlich setzt die Kombination von allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik dem Begriff von Lage und Form bei sehr kleinen Längen eine natürliche Grenze. Wegen der Unbestimmtheitsrelation muss man zur Festlegung sehr kleiner räumlicher Strukturen sehr große Impulse und Energien bereitstellen. Dadurch aber wird nach der allgemeinen Relativitätstheorie der Raum in seinen Maßeigenschaften, nämlich in seiner Krümmung verändert, was auf die zu bestimmende räumliche Struktur zurückwirkt. In dieser Weise wird für sehr kleine Längen der Begriff des räumlichen Abstandes in sich problematisch. Dies tritt allerdings erst für Abstände von der Größenordnung der sog. **Plancklänge** ein, die um zwanzig Zehnerpotenzen kleiner ist als der Durchmesser eines Atomkerns. Solche Längen werden noch lange für direkte Experimente unzugänglich sein.

zu B) **Mannigfaltigkeit der "Formen" von Elementarteilchen, "Formlücken"**

Wir haben gesehen, dass in der Quantentheorie an die Stelle des Begriffs des starren, scharf begrenzten Körpers der Begriff der Schrödingerschen Wellenfunktion tritt. Feste, zeitlich unveränderliche Formen werden in der Quantentheorie durch **stationäre Zustände** beschrieben. Das sind Wellenfunktionen, deren Gestalt in dem Sinne zeitlich unveränderlich ist, dass sie sich nur um einen einfachen Proportionalitätsfaktor ändern. Eine anschauliche und durchaus sachgemäße Analogie bilden die Schwingungsformen einer eingespannten Saite: Es gibt eine Grundschiwingung, die sich u.a. direkt als vorherrschende Tonhöhe der schwingenden Saite bemerkbar macht, und die Schwingungsfrequenz jeder möglichen "Oberschwingung" ist ein ganzzahliges Vielfaches der Grundschiwingungsfrequenz.

So wie die reinen Schwingungen einer Saite diskontinuierlich und durch ganze Zahlen beschreibbar sind, so auch die stationären Zustände eines quantenmechanischen Systems. Elementarteilchen erweisen sich nun als stationäre Zustände von Quantenfeldern, und so erklärt es sich, dass die Mannigfaltigkeit ihrer möglichen Formen diskret ist und dass Zwischenformen fehlen.

Es ist bemerkenswert, dass die Erscheinung der schwingenden Saite, bei der ganzzahlige Verhältnisse die reinen Formen eines kontinuierlichen Systems bestimmen, schon vor zweieinhalb Jahrtausenden den Pythagoreern bekannt und wichtig war.

zu C) **Identität gleicher Teilchen**

Wir betrachten als Beispiel ein System von zwei gleichen Elementarteilchen. Beide Teilchen unterscheiden sich in nichts außer in ihren Lagen und ihren Geschwindigkeiten. In der klassischen Physik kann man nun, wenigstens im Prinzip, die beiden Teilchen voneinander unterscheiden, indem man sie unablässig "im Auge behält", also ihre Bewegung durch dauernde Beobachtung verfolgt. Das bedeutet aber, dass man zu jeder Zeit Ort und Geschwindigkeit eines jeden der Teilchen kennen muss. In der Quantenmechanik verliert, wieder wegen der Unbestimmtheitsrelation, der Begriff der Bahn eines Teilchens seinen Sinn. Aus der praktischen Schwierigkeit einer durchgängigen Verfolgung der Bewegung wird eine prinzipielle Unmöglichkeit. Es ist nicht mehr möglich, gleiche Teilchen auch nur durch Anbringung gedanklicher Marken als individuell verschieden anzusehen. In einem System mehrerer gleicher Teilchen kann im Rahmen der Quantenmechanik nur noch von ihrer Anzahl, nicht aber von ihrer individuellen Verschiedenheit gesprochen werden. Was bleibt, ist das Symmetrieverhalten der Wellenfunktion bei Vertauschung der Teilchen. Es zeigt sich, dass es zwei sehr verschiedene Arten von Teilchen gibt, nämlich **Bosonen** (etwa das Photon) mit symmetrischer Wellenfunktion und **Fermionen** (etwa Proton und Elektron) mit Antisymmetrie: Zwei Fermionen können nie in demselben Zustand sein. Die Härte fester Körper besteht weitgehend auf diesem **Pauliprinzip**.

Ob ein Teilchen ein Fermion oder ein Boson ist, hängt vom Wert seines inneren Drehimpulses ab, der bei Fermionen halbzahlig, bei Bosonen ganzzahlig ist. Einer der ganz großen Erfolge der Quantenfeldtheorie besteht darin, dass sie diesen Zusammenhang zwischen innerem Drehimpuls und Fermi- oder Boseverhalten von Teilchen zu erklären vermag.

zu D) **Nahwirkung und Fernwirkung, Teilchen und Kräfte**

Wie bereits gesagt, sind Kräfte und Teilchen in der Quantenfeldtheorie nur zwei verschiedene Ausdrucksformen ein und derselben Wesenheit, nämlich des Quantenfeldes. Es ist unter gewissen Umständen möglich, eine Kraft durch den Austausch von Teilchen zu verstehen. Die elektrischen Kräfte zwischen Ladungen können beispielsweise entweder durch die Wirkung eines elektrischen Feldes oder durch den Austausch von Photonen beschrieben werden. Die Quantenfeldtheorie ist eine Nahwirkungstheorie; es gibt in ihr keine instantanen Kraftwirkungen über große Abstände wie in der Newtonschen Mechanik. Bemerkenswert ist auch, dass die Quantenfeldtheorie die

Existenz von Teilchen, nämlich von Feldquanten verstehen lässt.

zu E) **Ausdehnung und Teilbarkeit**

Wenn wir, wie es auch in der Quantenfeldtheorie geschieht, eine irgendwie geartete Ausgedehntheit der Elementarteilchen zugeben, was hindert uns dann daran, aus der gedanklichen Möglichkeit einer Teilung eine faktische zu machen, den in der Vorstellung vorgenommenen Schnitt wirklich durchzuführen? Ist die Forderung nach Unteilbarkeit mehr als ein bloßes Veto? Diese Frage ist umso ernster, als die Argumente für die Unteilbarkeit teilchenartiger elementarer Bausteine der Materie auch heute noch als triftig anzusehen sind.

Den Schlüssel zur Antwort gibt uns die spezielle Relativitätstheorie mit ihrer Gleichwertigkeit von Energie und Masse.

Zu bedenken ist nämlich, dass zur realen Durchführung eines Teilungsvorganges immer Energie aufzuwenden ist. Der erforderliche Energieaufwand ist klein, wenn es um die Ablösung eines Hüllenelektrons aus einem Atom geht, und zwar nur etwa ein Hundertmillionstel der Energie $E = Mc^2$, welche der Masse M des Atoms entspricht. Wesentlich schwerer ist es schon, aus einem Atomkern ein Proton oder ein Neutron herauszulösen. Die dazu nötige Energie beträgt ungefähr ein Prozent der Masseenergie des Kerns. Wenn es auch mit einem Energieaufwand, der einem mehrfachen seiner Masseenergie entspricht, nicht gelingt, ein Teilchen zu zerspalten, dann ist es mit den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie verträglich, dass eine Teilung überhaupt gänzlich unmöglich ist: Die aufgewendete Energie wird dann nicht zur Spaltung verbraucht sondern materialisiert sich wieder in Elementarteilchen. Gerade dies beobachtet man, wenn man etwa versucht, ein Elektron zu spalten. Selbst bei sehr hohem Energieaufwand treten nicht etwa Bruchstücke von Elektronen auf, sondern nur weitere Elektronen, Antielektronen und andere Teilchen oder Antiteilchen.

Wir sehen also: Wegen der Äquivalenz von Masse und Energie besteht die überraschende Möglichkeit, dass nach einer versuchten Teilung die "Teile" nicht kleiner sind als das Geteilte.

Dies zeigt sich auch, wenn man versucht, ein Proton oder ein Neutron zu teilen, nur sind hier die Verhältnisse noch um einiges interessanter als beim Elektron. Wie bereits erwähnt, gibt es Experimente, aus denen eindeutig hervorgeht, dass Proton und Neutron eine zusammengesetzte Struktur aufweisen. Sie bestehen (hauptsächlich) aus drei Quarks. In ähnlicher Weise bestehen auch alle anderen Hadronen aus Quarks und/oder Antiquarks.

Dennoch sind einzelne Quarks nie beobachtet worden, und sie werden sehr wahrscheinlich auch nie beobachtet werden. Wenn man etwa versucht, ein einzelnes Quark aus einem Proton herauszuziehen, so wird die dabei aufgewandte Energie nur dazu verbraucht, weitere Paare von Quarks und Anti-quarks zu erzeugen, die aber nicht etwa als freie Teilchen auftreten, sondern sich zusammen mit den vorhandenen Quarks immer nur wieder zu Hadronen der alten Art umlagern. Diese Eigenschaft der Quarkwechselwirkung heißt in der physikalischen Literatur **Confinement**, also Einschließung der Quarks.

Wir gelangen zu einer sehr überraschenden Erkenntnis:

Zusammengesetztheit ist nicht dasselbe wie Zerlegbarkeit. So sind Hadronen zwar aus Quarks und Antiquarks zusammengesetzt aber nicht in diese zerlegbar.

In dieser Hinsicht gleichen die Quarks sehr den Elachista des Epikur und Lukrez, allerdings mit einem entscheidenden Unterschied: Epikur und Lukrez mussten die Unabtrennbarkeit der Elachista ohne überzeugende Begründung einfach fordern, während die spezielle Relativitätstheorie zusammen mit der Quantenfeldtheorie die Confinementeigenschaft des Quarks als eine natürliche Möglichkeit anbietet.

Theoretisch könnten sich zwar eines Tages auch die Quarks wieder als zusammengesetzt erweisen, und es könnte sogar die Gefahr eines Regresses unendlicher Zusammengesetztheit bestehen. Da aber Zusammengesetztheit nicht mehr mit Teilbarkeit gleichzusetzen ist, besteht jedenfalls keinerlei gedankliche Notwendigkeit mehr für eine solche Annahme.

Hier wie auch bei den Antworten auf die anderen Fragen zu den elementaren Teilchen bietet also die zeitgenössische Physik überraschende und geistvolle Lösungsvorschläge zu uralten Problemen der Naturphilosophie, die man durch reines Denken ohne einen Blick auf die Aussage der Physik schwerlich aufgefunden hätte.

Es wäre gewiss vermessen und gegen alle geschichtliche Erfahrung, an die Endgültigkeit des Naturbildes der heutigen Physik zu glauben. Veränderungen und Erweiterungen auch in den Grundlagen sind durchaus zu erwarten. Insbesondere deutet vieles darauf hin, dass das ungelöste Problem der Vereinigung von Quanten- und Gravitationstheorie fundamental neuartige Ansätze erfordert.

Dennoch werden die Antworten auf die Probleme von Teilchen und Teilbarkeit mit großer Sicherheit ihre Gültigkeit behalten, da sie nur einfachste,

bestens bestätigte Aussagen von Relativitäts- und Quantentheorie heranziehen. dass das physikalische Denken keinesfalls an ein Ende gekommen ist, mag eine kurze Liste offener fundamentaler Fragen verdeutlichen:

- Zunächst steht in der gegenwärtigen Teilchenphysik noch immer der endgültige Beweis dafür aus, dass das gegenwärtig bevorzugte feldtheoretische Modell der fundamentalen Kräfte wirklich die Confinementeigenschaft hat, obwohl die bisherigen Modellrechnungen kaum noch einen Zweifel daran erlauben.
- Das Problem der Vereinigung aller Wechselwirkungen, insbesondere der Einbeziehung der Gravitation ist ungelöst.
- Es gibt keine akzeptierte Erklärung für die Anzahl der fundamentalen Fermion- und Austauschbosonfelder.
- Der Ursprung von Raum und Zeit bleibt ein Rätsel.

- [1] Aristoteles, Über Werden und Vergehen 325 a, 3 ff
- [2] Epikurs Brief an Herodot (Diogenes Laertios 10, 39 f)
- [3] Aristoteles, Über Werden und Vergehen 316 a, 15 ff
- [4] Lukrez, de rerum natura 1, 615 ff
- [5] Lukrez, de rerum natura 1, 599 ff

Zitate nach A. Stückelberger, Antike Atomphysik
Heimeran Verlag, München, 1979 (Tusculum-Bcherei)