

WALTER DRÖSCHER

WELTBILDER DER PHYSIK

1. Die Bedeutung der Physik im Alltag

Technische Errungenschaften sind aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie erleichtern uns das Leben, wir sind aber von ihnen abhängig geworden. Ob wir uns in der Welt der Technik als Sklaven fühlen, bleibe dahingestellt. Unbestritten sind jedoch der Einfluß und die Macht der Technik, die unser Leben beherrschen. *Technik* ist allerdings nichts anderes als *angewandte Physik*, die Lehre von den Eigenschaften der unbelebten Materie.

Ihre vielfältigen Erscheinungsformen werden in der Physik auf wenige Grundgesetze zurückgeführt. Man hatte schon immer Vorstellungen über physikalische Phänomene, doch erst in den letzten drei Jahrhunderten hat man deren richtige Form erkannt. Die Schicht für Schicht entstandenen unterschiedlichen Anschauungsformen der unbelebten Materie sollen in den nachfolgend skizzierten „Weltbildern der Physik“ wiedergegeben werden.

2. Die Naturphilosophie der Antike

Schon frühzeitig beschäftigte man sich mit *Sonne, Mond* und *Sternen*. Demnach ist es nicht verwunderlich, daß sich bereits Babylonier, Inder, Ägypter und viele andere Völker mit dem Lauf der Gestirne befaßten. Sie schufen unterschiedliche Weltbilder mit hintergründiger Sinnhaftigkeit. Diese Ideen übten jedoch nur sehr geringen Einfluß auf die moderne Naturwissenschaft aus. Als deren Wiege kann die *Naturphilosophie der Griechen* in den letzten vorchristlichen Jahrhunderten angesehen werden; ihre Grundideen ziehen sich wie ein roter Faden in die Naturwissenschaft unserer Zeit hinein. Den nachhaltigsten Einfluß haben PLATO, ARISTOTELES und DEMOKRIT ausgeübt, wobei ARISTOTELES an vorderster Stelle steht. Er beherrschte das Denken der Menschheit fast zwei Jahrtausende hindurch.

Der griechische Philosoph PLATO (427 – 347) ist für seine *Ideenlehre* bekannt, gemäß der *Ideen* die eigentliche Wirklichkeit des Seienden sind. ARISTOTELES (384 – 322 v. Chr.) bildete den platonischen Idealis-

mus weiter aus und um und beeinflusste die abendländische Geistesgeschichte am nachhaltigsten. In seinem Denken spielt insbesondere das Konzept der *Teleologie* eine zentrale Rolle, was etwa bedeutet, daß Erscheinungsformen der Materie von einem Endzweck verursacht werden. Das Verhalten von Objekten und Systemen folge einem Plan, einer Bestimmung. Lebende Organismen verhalten sich wie ein uns nicht unmittelbar zugängliches Ganzes, weil es, bevor sich noch der Organismus vollständig entwickelt hat, eine vollständige und umfassende Idee gibt. In der Aristotelischen Welt bildete die unbewegliche Erde den Mittelpunkt des Weltalls. Vier Elemente – *Erde, Wasser, Luft und Feuer* – umgaben die Erdkugel, die Sphäre des Irdischen. Diese Sphäre wurde von der Himmelssphäre umgeben, die aus dem fünften Element, dem *Äther*, bestand.

Im direkten Gegensatz zu ARISTOTELES standen die griechischen Atomisten, z. B. DEMOKRIT (460 – 371). Ihrer Lehre nach bestand die Welt aus nichts anderem als aus *Atomen*, die sich im leeren Raum bewegten. Alle Strukturen und Formen bestanden aus verschiedenen angeordneten Atomen, alle Veränderungen und Prozesse waren auf die Umschichtung von Atomen zurückzuführen. Das Universum war demnach eine Maschine, die Umordnung der Atome wird von blinden Kräften bestimmt. Einen Gesamtplan, eine finale Bestimmung gibt es der Atomlehre nach nicht mehr, die Teleologie wird als mystische Vorstellung verworfen.

Der *Atomismus* steht heutzutage für das, was wir als materialistisches, naturwissenschaftliches Weltbild bezeichnen können. Somit stehen einander zwei Gegensätze gegenüber, einerseits die synthetische, *zweckbestimmte* Welt des ARISTOTELES und andererseits die streng *materialistische* Welt der Atomisten, die sich letztlich in die bloße mechanische Aktivität von Elementarteilchen auflösen läßt.

In den modernen Naturwissenschaften hat dieses reduktionistische Weltbild bei einfachen Systemen unzweifelhaft große Erfolge gebracht, bei komplexen Systemen scheint aber der Reduktionismus zu versagen. Eine Synthese zwischen dem Weltbild der Atomisten und dem ganzheitlichen Weltbild des ARISTOTELES scheint hier angebracht.

3. Das Newton'sche Weltbild – Wurzel des Materialismus

Nach diesem Ausflug zu den Wurzeln unseres derzeitigen naturwissenschaftlichen Denkens komme ich nunmehr zum *neuzeitlichen Weltbild*, an dessen Beginn Nikolaus KOPERNIKUS (1473 – 1543) steht. Er war es,

der das 1800 Jahre alte Weltbild des ARISTOTELES dadurch angriff, daß nicht mehr die Erde Mittelpunkt des Universums sei, sondern die Sonne, um die sich in Kreisbahnen die Planeten bewegten.

Galileo GALILEI (1564 – 1642) und Johannes KEPLER (1571 – 1630) bauten das Kopernikanische Weltsystem weiter aus, dessen endgültiger Sieg ist jedoch Isaac NEWTON (1643 – 1727) zu verdanken.

1686 veröffentlichte NEWTON die „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“, also die mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie. Das Kernstück dieser „*Principia*“ sind *drei Bewegungsgesetze*. Ausgehend von diesen Bewegungsgesetzen und unter Zuhilfenahme des *Gravitationsgesetzes*, das eine Kraft zwischen Körpern annimmt, die mit dem Quadrat der Entfernung kleiner wird, konnte er nunmehr sowohl die himmlischen Planetengesetze als auch die irdischen Fallgesetze ableiten. Himmlische und irdische Physik wurden somit vereint, die bei ARISTOTELES noch vorhandene Trennung zwischen irdischer Sphäre und den Himmelssphären wurde somit aufgehoben.

Die Grundlagen der Mechanik waren somit geschaffen, die im Laufe des 18. Jahrhunderts immer mehr erklären konnte. Das Universum konnte als eine große Maschine aufgefaßt werden, das Wirken Gottes wurde – da man mechanisch so vieles erklären konnte – nicht mehr gebraucht. Dies veranlaßte Pierre LAPLACE (1749 – 1827) zu der Äußerung, daß ein Geist, der für einen gegebenen Augenblick alle Kräfte kennen würde, von denen die Natur belebt ist, sowie die gegenseitige Lage der Wesen, aus denen sie besteht, und der überdies umfassend genug wäre, um diese Gegebenheiten zu analysieren, mit derselben Formel die Bewegung der größten Weltkörper und des kleinsten Atoms ausdrücken könnte. Nichts wäre für ihn ungewiß, Zukunft und Vergangenheit lägen offen vor seinen Augen.

Diese Laplace'sche Behauptung bedeutet, daß – mag die Zukunft in unseren Augen auch ungewiß sein – doch in Wirklichkeit alles Geschehen bis in alle Einzelheiten festgelegt ist. Entscheidungen oder Taten eines Menschen können am Schicksal eines Atoms nicht das geringste ändern. Da wir aus Atomen bestehen und Teil eines Universums sind, ist unser Schicksal vollkommen determiniert. Der ganze Kosmos ist zu einem Uhrwerk reduziert.

Wie sich noch zeigen wird, ist der hier propagierte Determinismus nur beschränkt gültig, die in unserem Jahrhundert geschaffene Quantentheorie und die erst in jüngster Zeit entstandene Chaostheorie widerlegen die Laplace'sche Behauptung. Eines ist aber gewiß: der Triumph des Materialismus geht auf die Mechanik zurück, die im 19. Jahr-

hundert allmählich auch alle Erscheinungen der *Wärmelehre* erklären konnte.

Alltägliche Vorgänge, bei denen Energie umgewandelt wird und die Wärmeenergie eine Rolle spielt, weisen die Besonderheit auf, daß sie irreversibel sind. Dreht sich ein Rad mit Reibung um eine Achse, dann wird Wärme erzeugt, die langsam an die Umgebung abgegeben wird. Kaltes Wasser auf einem heißen Ofen wird erwärmt, der Ofen wird kühler, Wärme geht auf das Wasser vom Ofen über. Niemals geschieht es, daß die einer Achse eines Rades zugeführte Wärme das Rad zum Drehen bringt und daß das kalte Wasser noch kälter wird.

Die Richtung dieser irreversiblen Vorgänge beschrieb erstmals Rudolf CLAUSIUS (1822 – 1888) durch eine mathematische Größe, genannt *Entropie*, die in abgeschlossenen Systemen nur zunehmen, aber nicht abnehmen kann.

Das Weltgeschehen läuft somit in der Weise ab, daß Wärme von heißen zu kühleren Körpern fließt und schließlich ein Temperaturngleichgewicht zustande kommt.

Im ganzen Weltall wird sich schließlich die Wärme gleichmäßig verteilen, bis ein Universum mit maximaler Entropie, das heißt, ein gleichmäßig temperiertes Universum vorliegt. Dieses Gespenst des unentrinnbaren Wärmetodes schockierte die Menschen im vorigen Jahrhundert und wies auf die unentrinnbare Vergänglichkeit des Menschengeschlechtes hin.

Mit den Erfolgen der kinetischen Gastheorie war ein weiterer Baustein dafür gesetzt, daß Materie aus Atomen bestand. Das 19. Jahrhundert brachte den Siegeszug der Mechanik und damit des Materialismus, aber auch die Auflösung des primitiven Materiebegriffes, wie die Geschichte der *Elektrodynamik* zeigt.

4. Die Auflösung des primitiven Materialismus

In Frankreich und in Deutschland standen einander nach den ersten Anfängen einer *Elektrizitätslehre* zu Beginn des 19. Jahrhunderts zwei verschiedene Weltauffassungen gegenüber – das *mechanistische Weltbild*, das der rationalen Weltansicht der Französischen Revolution am ehesten entsprach, und die deutsche romantische *Naturphilosophie*, die alle Kräfte – heutzutage würden wir Energien sagen – als den Aspekt einer einzigen Kraft sah, der Kraft des *Weltgeistes*. Alle Naturerscheinungen wie *Wärme*, *Elektrizität*, *Magnetismus* usw. waren somit ineinander umwandelbar.

Die *deutsche Naturphilosophie* hatte einen unübersehbaren, wichtigen Einfluß auf die Entwicklung der Physik gehabt. Ihr Weltgeist ließ Physiker Zusammenhänge vermuten, wo vorerst nur isolierte Einzeltatsachen vorlagen. Der Einfluß der Philosophie reichte aber weit über die Physik hinaus, was dazu führte, daß der deutsche Idealismus die Physik aus den Prinzipien des reinen Denkens heraus auf eine gesicherte Grundlage, ohne empirische Befunde, zu stellen versuchte, was aber schmächtig mißlang. Dies hatte weitreichende Folgen: Die Philosophie, die eine Niederlage erlitten hatte, wandte sich von der Naturwissenschaft ab. Die Ergebnisse der Naturwissenschaft wurden zu pragmatischen, oberflächlichen Verbindungen erklärt. Diese *tiefe Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaft* ist auch heute noch spürbar. Beeinflußt von der Idee der genannten deutschen Naturphilosophie begann vorerst Hans Christian ÖRSTED (1777 – 1851) nach einem Zusammenhang zwischen *Elektrizität* und *Magnetismus* zu suchen. Er fand, daß ein stromführender Leiter auf eine Magnethnadel eine drehende Kraft ausübte.

Michael FARADAY (1791 – 1867) baute auf den Erkenntnissen von ÖRSTED auf und es gelang ihm zu zeigen, wie umgekehrt Magnetismus in Elektrizität verwandelt werden konnte. Er entdeckte, daß veränderliche magnetische Felder elektrische Ströme hervorrufen können.

FARADAY führte weiters noch einen der wesentlichsten Begriffe in die Physik ein: den *Feldbegriff*. Rings um den Pol eines Magneten verändert sich der Raum, wie man beispielsweise mittels Eisenfeilspänen feststellen kann. Den veränderten Zustand des Raumes bezeichnete er als „*Feld*“ und die beobachtbaren Linien als *Feldlinien*. Damit war ein radikaler Schritt getan: Außerhalb der sichtbaren Materie war der Raum nicht leer. Kräfte wirkten nicht mehr auf geheimnisvolle Weise durch den leeren Raum, sondern sie breiteten sich aus, wie die Feldlinien anschaulich zeigten. FARADAY stellte sich das Feld als eine Art Spannungszustand eines überall vorhandenen Äthers dar.

Unter Zuhilfenahme dieses Feldbegriffes war 1856 James Clerk MAXWELL in der Lage, die von FARADAY vorgetragenen Ideen in mathematische Formeln zu fassen und zu erweitern. Das Ergebnis seiner Überlegungen sind die *Maxwell'schen Feldgleichungen*, deren Bedeutung nur mit den Newton'schen Gleichungen für die Bewegung von Körpern verglichen werden können.

Mit Hilfe des Instrumentariums der Maxwell'schen Feldgleichungen konnte sich die Elektrotechnik, insbesondere die Nachrichtentechnik, stürmisch entwickeln.

Während die Felder zur unbestreitbaren Realität des Universums wurden, verlor der Äther selbst in einer der größten Revolutionen der Physikgeschichte im Jahre 1905 seine Existenzberechtigung. Diese Revolution ist mit Albert EINSTEIN (1879 – 1955) verknüpft.

5. Das neue Gesicht von Raum und Zeit nach A. Einstein

Vorerst soll aber noch kurz auf die Geschichte des Äthers eingegangen werden.

Mit *Äther* wird im Griechischen die reine, strahlende Himmelsluft bezeichnet. Den Philosophen der griechischen Antike galt er nicht nur als feinsten Urstoff der Welt, als Pneuma oder Weltseele, sondern auch als Quintessenz des Himmels.

In der Physik wird er in der Renaissance zum substantiellen Träger des Lichtes und der Gravitation. Im 19. Jahrhundert wuchs ihm die Rolle als Träger optischer Erscheinungen bzw. als Medium elektromagnetischer Zustände zu. Es bestand die Vorstellung, daß die Sterne im Äther ruhten, die Planeten und ihre Trabanten sich jedoch durch den ruhenden Äther bewegten. Dies bewog 1880 Albert Abraham MICHELSON (1852 – 1931), mit Hilfe eines Interferometers die Zeiten zu messen, die das Licht braucht, um gleiche Wegstrecken in und senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde zurückzulegen. Da der Äther ruhen sollte, die Erde sich aber im Äther bewegt und das Licht sich im Äther fortpflanzt, hätte die Lichtgeschwindigkeit in Bewegungsrichtung der Erde, von der bewegten Erde aus gesehen, kleiner als senkrecht zu ihr sein müssen. Zwischen den senkrecht zueinander ausgesandten Lichtstrahlen wurde aber keine Zeitdifferenz festgestellt, die Hypothese des ruhenden Äthers konnte somit nicht stimmen, das Licht breitete sich mit konstanter Geschwindigkeit nach allen Richtungen aus. Zusätzlich noch andere angestellte Experimente wiesen ebenfalls auf die Unmeßbarkeit einer Geschwindigkeit der Erde in bezug auf einen ruhenden Äther hin.

Albert EINSTEIN (1879 – 1955) wußte von dieser Unmöglichkeit, die Geschwindigkeit der Erde im Äther zu messen und von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Für ihn konnte dies nur bedeuten, daß es eine Geschwindigkeit der Erde im ruhenden Äther nicht gab, also ein ausgezeichnetes Bezugssystem, und zwar den ruhenden Äther, sondern nur eine Relativbewegung der Erde zu anderen Körpern. EINSTEIN setzte nun anstelle eines ausgezeichneten Bezugssystems eine unendliche Menge gleichförmig bewegter Systeme. In jedem dieser Bezugssysteme breitete sich das Licht mit gleicher Geschwindigkeit aus.

Diejenige Theorie, die nun den genannten Kriterien genügte, ist die *Spezielle Relativitätstheorie*, die er 1905 veröffentlichte. Aus dieser geht hervor, daß es nicht mehr eine einzige universelle Zeit gibt, sondern daß jedes gleichförmig bewegte Bezugssystem seine eigene Zeit hat. Von einem Ruhesystem aus gesehen erscheint die Zeit im bewegten System als verlangsamt und ein räumlicher Abstand als verkürzt. Weiters ergibt sich, daß die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit ist. Jeder trägen Masse entspricht schließlich eine äquivalente Energie $E = mc^2$. Raum und Zeit sind gemäß der Speziellen Relativitätstheorie nicht mehr unabhängig voneinander, sondern in einer vierdimensionalen Raumzeit miteinander verbunden. Somit wurde der starre, unveränderliche euklidische Raum und eine davon unabhängige Zeit nach Newton'scher Ansicht durch eine Raumzeit mit veränderlichen Raumzeitkoordinaten abgelöst – ein neues Weltbild war geboren.

Eine weitere Leistung EINSTEINs bestand vor allem auch darin, die Idee des *gekrümmten Raumes* mit der Physik der Schwerkraft in Verbindung gebracht zu haben. In seiner 1915 veröffentlichten *Allgemeinen Relativitätstheorie* konnte er zeigen, daß ein gravitatives Feld den Raum krümmt, so daß ein materielles Objekt in diesem Gravitationsfeld schwerelos längs Geodäten – Linien kürzester Verbindung – fällt. Die Lichtablenkung nahe dem Schwerfeld der Sonne, die Periheldrehung des Merkur und die Änderung der Frequenz des Lichtes im Schwerfeld lieferten die experimentellen Beweise für seine Allgemeine Relativitätstheorie. Wenn auch die Allgemeine Relativitätstheorie nur unmerkliche praktische Auswirkungen hatte, so trug sie doch Wesentliches zur Entstehungsgeschichte des Universums bei.

6. Das Bild des Kosmos im 20. Jahrhundert

1917 brachte A. EINSTEIN einen Artikel mit dem Titel „Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie“ heraus. Da die Gravitation anziehende Wirkung hat, mußte EINSTEIN, um ein Zusammenstürzen des Universums durch die Schwerkraft zu verhindern, einen kosmologischen Term in seine Feldgleichungen einführen, um einen ewig gleichbleibenden Kosmos zu erhalten. Dieser Term hatte die Wirkung einer abstoßenden Kraft. Wie sich aber mathematisch herausstellte, genügte die Möglichkeit einer geringen Abweichung von einem Gleichgewichtszustand, um den Kosmos entweder zur Expansion oder zum Zusammenstürzen zu bringen. A. EINSTEIN beklagte später diesen kosmologischen Term als den größten Fehler seines Lebens.

1922 konnte Alexander Alexandrowitsch FRIDMANN zeigen, daß ohne den kosmologischen Term die Einstein'schen Feldgleichungen Lösungen besaßen, die ein ursprünglich auf kleinstem Raum vorhandenes Universum wiedergaben. Das derzeitig noch immer expandierende Universum hat hierbei die Eigenschaft, daß von einem in ihm beliebigen gewählten Beobachtungspunkt die Galaxien wegzueilen scheinen, je weiter – um so schneller. Ist die ursprüngliche Wucht genügend stark und kann die durch die Gravitationsanziehung sich verlangsamende Expansion nicht gestoppt werden, dann liegt, so geht aus den Friedmann'schen Lösungen hervor, ein offenes, in alle Ewigkeit expandierendes Universum vor. Kommt es zu einer Umkehrbewegung, dann gibt es ein geschlossenes, endliches Universum, das nach endlich langer Zeit wieder zusammenstürzt.

Dieses Ergebnis konnte Edwin HUBBLE (1889 – 1953) experimentell glaubhaft machen. Eine gemessene *Rotverschiebung* der Spektrallinien entfernter Galaxien verriet, daß sich die Galaxien mit zunehmender Entfernung von uns immer schneller wegbewegten und einstmals von einer Singularität aus ein *Urknall* stattgefunden hatte. Heutzutage ist es noch nicht möglich zu entscheiden, in welchem Universum wir uns befinden. Unter Zuhilfenahme einer nicht sichtbaren Materie wird angenommen, daß die Expansion nach unendlich langer Zeit zum Stillstand kommen wird.

1965 ergab sich eine weitere Bestätigung der Urknalltheorie. Die kosmische $2,7\text{ °K}$ Hintergrundstrahlung wurde von Arno Allen PENZIAS und Robert W. WILSON entdeckt, die Georg GAMOV mit seinen Mitarbeitern bereits rund 20 Jahre zuvor vorausgesagt hatte. Er vermutete, daß die hohen Temperaturen in den ersten Minuten der Lebensdauer des Universums zu intensiven Kernreaktionen geführt hatten, die einen Teil der heutigen Elemente hervorbrachten. Aus der Theorie der Elemententstehung konnten sie eine Anfangstemperatur abschätzen, von der heutzutage nur mehr eine Hintergrundstrahlung von etwa 5 °K übriggeblieben wäre. Dieser theoretische Wert deckt sich ganz gut mit den von PENZIAS und WILSON aufgefundenen Wert von $2,7\text{ °K}$. Eine weitere Bestätigung der Urknalltheorie ergibt sich dann noch aus dem richtig vorausgesagten Mischungsverhältnis der Elemente Wasserstoff, Helium und Lithium. Fraglich ist aber noch immer, von wo die Masse des heutigen Universums stammt und welche Kraft die Expansion verursacht hat.

Eine Antwort darauf gibt die Idee des *inflationären Universums*, die Alan GUTH in den achtziger Jahren entwickelt hat. Seiner Meinung

nach war die kosmische Abstoßung im jungen Universum sehr stark, hingegen ist sie heutzutage verschwindend klein und somit nur mehr von inferiorer Bedeutung.

Mit der Inflation kann die heutzutage festgestellte Expansionsrate, also ein Universum an der Grenze zwischen geschlossen und offen, erklärt werden. Auf Schwierigkeiten stößt man aber noch immer bei der Erklärung der Entstehung von großräumigen Strukturen, wie *Welt-raumbblasen* einerseits und kleineren Strukturen wie *Galaxien* andererseits. Eine Bestätigung des inflationären Modells ergab sich erst in jüngster Zeit durch die vom COBE-Satelliten ermittelten Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Nach diesen Ausführungen über die mögliche Geschichte des Universums soll nunmehr auf die Quantentheorie eingegangen werden, die das alte Weltbild der klassischen Physik, einer Physik vertrauter Vorstellungen am Beginn unseres Jahrhunderts, total veränderte.

7. Die Quantentheorie – das Ende des Determinismus

Begonnen hat die *Quantentheorie* mit Max PLANCK (1858 – 1947), der um die Jahrhundertwende eine Strahlungsformel für die Wärmeabstrahlung schwarzer Körper fand, gemäß der die Wärmestrahlung in Energiepaketen, also gequantelt, abgegeben wird. A. EINSTEIN bestätigte Jahre später diese Lichtquantenhypothese und bekam dafür 1921 den Nobelpreis.

Somit zeigte sich, daß das Licht nicht nur eine Wellennatur besaß, sondern auch Teilchencharakter hatte, Umgekehrt kann aber auch vermutet werden, daß materielle Teilchen Welleneigenschaften haben. Damit wäre erst die volle Symmetrie hergestellt. Diese Idee legte 1924 Louis Victor Prince de BROGLIE (1892 – 1987) in einer Dissertation nieder. 1926 konnten Clinton DAVISSON (1881 – 1958) und Lest GERMER (1896 – 1971) beweisen, daß Elektronen beim Durchgang von Kristallen Interferenzmuster zeigten und somit Welleneigenschaften haben. Damit war das Komplementaritätsprinzip, das später Niels BOHR (1885 – 1962) formulierte, geboren. Ein Elektron ist nicht ein Teilchen oder eine Welle, sondern in Vereinigung mit einer bestimmten Versuchsanordnung verhält es sich einmal als Teilchen, dann aber wieder als Welle. Nachdem 1913 N. BOHR ein Atommodell aufgestellt hatte, gemäß dem Elektronen einen Kern in bestimmten Bahnen umkreisen und hierbei keine Strahlung abgeben, hatte man vergeblich versucht, die neue Theorie auf das Wasserstoffatom und andere Atome chemi-

schers Elemente anzuwenden. Erst Erwin SCHRÖDINGER (1887 – 1961) gelang es 1926, eine Wellengleichung aufzustellen, mit der die Probleme an einem Atom, richtig vorausgesagt, behandelt werden konnten. Die Ausbreitung einer Elektronenwelle kann mit Hilfe der Schrödingergleichung angegeben werden; Geigerzähler, die das Auftreffen von Elektronen in verschiedenen Richtungen registrieren, stellen aber nur Teilchen, doch keine Wellen fest.

Diese Problematik wurde von Max BORN (1882 – 1970) dahingehend gelöst, daß er die Intensität einer Welle als diejenige Wahrscheinlichkeit interpretierte, ein Teilchen in einem bestimmten Raumgebiet anzutreffen. Diese Deutung hatte aber zur Folge, daß es nicht mehr möglich war, den exakten Aufenthaltsort und damit die exakte Bahn eines Teilchens anzugeben. Die Laplace'sche Behauptung, die Natur sei vorausrechenbar und damit deterministisch, galt fortan nicht mehr, ein neues Weltbild war entstanden.

a) Heisenbergsche Unschärferelation

Werner HEISENBERG (1906 – 1976) war es, der die weitere Entwicklung der Quantentheorie vorantrieb.

Wenn man angeben will, wo sich der Ort eines Elektrons befindet, dann muß man dies messen. Jede Messung stört aber das zu beobachtende Objekt. Denn wird das Elektron von einem Lichtquant getroffen, dann ändert es seine Bewegung, seinen Impuls. Je genauer der Ort bestimmt wird, um so ungenauer ist der Impuls bekannt und umgekehrt. Dieses Prinzip ist der Inhalt der *Heisenbergschen Unschärferelation*, die zu einer radikalen Änderung des Begriffssystems der Physik führte. Zusammen mit dem Bohr'schen Komplementaritätsprinzip, daß z. B. ein Elektron weder Teilchen noch Welle ist, sondern sich in Vereinigung mit einer bestimmten Versuchsanordnung einmal als Teilchen und dann wiederum als Welle verhält, war die offizielle Philosophie der Quantenmechanik, und zwar die „Kopenhagener Deutung“ festgelegt.

Der Unterschied zur klassischen Physik bestand darin, daß diese das Weltgeschehen genau vorauszuberechnen suchte, mit der Wellenfunktion der Quantentheorie hingegen konnte man nur mehr ein mögliches Geschehen bestimmen. Der Zufall hatte sich in der Physik etabliert.

Im mathematischen Sinne läßt sich mit der Quantentheorie formal sehr gut umgehen, eine einzige Deutung ihrer wirklichen Realität ist aber heutzutage noch nicht möglich, es existiert vielmehr eine Anzahl

möglicher und sich voneinander unterscheidender Deutungen, von denen jede einen Teilaspekt der wahren Wirklichkeit wiederzugeben scheint.

b) Deutungen

Nach einer ersten Version der *Kopenhagener Deutung* besitzt ein Quantenobjekt, also ein Objekt, das mit Teilchen- und Wellencharakter ausgestattet ist, keine ihm nur eigene Eigenschaften, sondern es werden diese dem gemeinsamen Produkt von Quantenobjekt und Meßanordnung zugezählt.

Eine weitere Version der Kopenhagener Deutung meint, daß die Welt im Akt der Beobachtung geschaffen wird.

Eine wiederum andere Deutung betont, daß die Welt ein ungeteiltes Ganzes ist. Zwei Quantenobjekte, die einmal in Wechselwirkung miteinander getreten sind, werden nicht mehr als zwei aufgespaltene Wellenformen betrachtet, sondern als eine Ganzheit angesehen.

Die *Viel-Welten-Deutung* hebt hingegen hervor, daß das Universum sich bei jedem Meßvorgang in eine Vielzahl von Universen aufspaltet, die in jeder Einzelheit, mit Ausnahme des Einzelereignisses, identisch sind.

Der *Neorealismus* verweist darauf, daß die Welt aus gewöhnlichen Objekten aufgebaut ist. Neorealistische Modelle bedingen aber die Existenz von realen Feldern, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müßten.

Eine weitere Deutung behauptet, *Bewußtsein* schaffe Realität.

Eine andere Deutung nimmt an, daß man mehr brauche als gewöhnliche Logik, um dem Faktischen gerecht zu werden.

Das *doppelte Universum* von Werner HEISENBERG gibt hingegen letztendlich an, daß vor einem Meßvorgang ein Quantenobjekt nur eine magere Art von Existenz besitzt, nach einem Meßvorgang aber erst in den vollen Status der Realität erhoben wird.

Ob überhaupt eine der Deutungen und welche von diesen richtig ist, bleibt der Zukunft vorbehalten.

c) Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie

Nunmehr möchte ich aber wieder zur *Wellenmechanik* von SCHRÖDINGER bzw. zur *Matrizenmechanik* nach HEISENBERG zurückkehren. Beide Theorien hatten einen Nachteil: Deren Gleichungen waren nicht mit der Speziellen Relativitätstheorie im Einklang.

Paul Adrian DIRAC (1902 – 1984) war es, der eine Verallgemeinerung der Schrödingergleichung fand, die das Verhalten eines Elektrons im Atom auch nahe der Lichtgeschwindigkeit beschrieb und nebenbei auch ein neues Teilchen voraussagte. Dieses, genannt *Positron*, konnte Carl David ANDERSON 1932 in der Höhenstrahlung nachweisen.

Die Diracgleichung war der erste Schritt, der von einer Quantentheorie, die das Verhalten von einzelnen Teilchen unter der Wirkung von Kräften beschrieb und somit als Quantenmechanik bezeichnet werden konnte, zu einer *Quantenfeldtheorie* führte.

Das Verhalten vieler Teilchen wurde in einem einzigen Formalismus erfaßt. Alle gleichartigen Teilchen dieser Welt konnten als ein Aspekt eines einzigen, riesigen Feldes aufgefaßt werden. Man war der Ansicht eines einzigen „Urstoffes“ wiederum nähergekommen: Denn zwischen materiellen Teilchen wirkten Kräfte, deren Ursache Wellen waren, die Kraft und Energie übertrugen. Nach dem Dualismus Teilchen – Welle mußte somit der *elektromagnetischen Welle* ein Teilchenstrom von Photonen entsprechen. Auf diese Weise werden zwei klassisch gegensätzliche Begriffe, und zwar Teilchen und Welle, durch die Quantenfeldtheorie vereinheitlicht. Nach der Heisenberg'schen Unschärferelation kann die Energie im Raum kurzzeitig schwanken, dadurch können Paare von Teilchen wie Elektronen und Positronen, Protonen und Antiprotonen usw. kurzzeitig entstehen und wieder verschwinden. Alle Teilchenarten führen somit ein kurzzeitiges Geisterdasein, das Vakuum schwankt.

Die Welt der zwanziger Jahre war noch einfach aufgebaut, sie bestand aus Protonen und Elektronen. Mit der Entwicklung von Teilchenbeschleunigern nahm die Inflation von unterschiedlichen Teilchen im Subatomaren rapide zu. Hunderte von Teilchen wurden entdeckt, das Chaos war perfekt.

8. Die vier Wechselwirkungskräfte und deren Vereinheitlichung

Um die unterschiedlichen Teilchenarten wieder miteinander verknüpfen zu können, besann man sich wiederum auf die antike Idee einer Symmetrie, die PLATO in seinem Aufbau der Materie nach dem Muster von fünf einfachen Körpern kreiert hatte. Diese Idee wurde von der modernen Elementarteilchenphysik aufgegriffen. Es zeigte sich, daß ein spezielles Symmetrieschema, $SU(3)$ genannt, eine große Anzahl der aufgefundenen Teilchen einheitlich erklären konnte. 1964 entdeckten Georg ZWEIG und Murray GELL-MANN unabhängig voneinander, daß die $SU(3)$ -Symmetrie der Teilchen auf ein tieferes Bauprinzip zurückge-

führt werden konnte. Aus sogenannten *Quarks* bzw. Antiquarks konnte die Gruppe der *Hadronen* aufgebaut werden. Die Quarks können drei unterschiedliche Farbladungen besitzen, die Farbkraft vermitteln. Die zugehörigen Botenteilchen werden *Gluonen* genannt und haben eine Reichweite von etwa 10^{-15} m.

Neben dieser *starken Wechselwirkungskraft* existiert die bereits vertraute Wechselwirkungskraft elektrischer und magnetischer Kräfte, deren Botenteilchen die bekannten *Photonen* sind. Deren Reichweite ist unendlich. Die zugehörige Quantenfeldtheorie, auch *Elektroquantendynamik* genannt, der die Maxwell'sche Feldtheorie zugrunde liegt, hat einen besonderen Sieg in der Physik errungen. Theoretische und experimentelle Größen der Elektrodynamik unterscheiden sich oft erst in den höheren Dezimalen.

Der Zerfall radioaktiver Atome und insbesondere der Zerfall eines Neutrons in ein Proton, Elektron und Neutrino geht auf eine weitere Wechselwirkungskraft zurück, und zwar auf die *schwache Wechselwirkungskraft*. Ihre Kraft wirkt nur etwa 10^{-18} m und sie ist schwächer als die elektromagnetische Kraft. Vermittelt wird die schwache Kraft durch massive *Bosonen*, den W- und Z-Bosonen.

Die schwächste aller bekannten Wechselwirkungskräfte ist die *gravitative Kraft*, deren wahre Rolle als Naturkraft erst mit NEWTON im 17. Jahrhundert erkannt wurde. Die Reichweite des Gravitationsfeldes ist, so wird angenommen, unendlich und die gravitative Kraft soll durch Gravitonen vermittelt werden. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie wird sie als eine Krümmung der Raumzeit angesehen.

9. Symmetrien und Vereinheitlichungen der Wechselwirkungen

a) Eichsymmetrie

Um ein mehr als eine Wechselwirkung umfassendes Konzept zu finden, besann man sich auf ein Symmetrieprinzip, das die Gleichungen einer Wechselwirkung bei bestimmten Operationen unverändert läßt. Es ist unter dem Namen *Eichsymmetrie* bekannt geworden. Eichsymmetrien hängen mit der Idee zusammen, daß das Niveau einer physikalischen Größe neu geeicht werden kann, ohne die physikalischen Gleichungen bei einer derartigen Niveaushiftung zu verändern.

Nun sind aber physikalische Gesetze im allgemeinen nicht invariant bei solchen Änderungen. Vergleichbar ist dies mit dem Flug eines Raumschiffes, bei dem die Ortskoordinaten während des Fluges örtlich

unterschiedlich verändert werden. Das Raumschiff wird somit auf einem Zick-Zackkurs fliegen und die Passagiere werden unterschiedliche Beschleunigungskräfte verspüren. Die auftretenden Kräfte können aber durch ein geeignetes, örtlich unterschiedlich wirkendes Gravitationsfeld wegtransformiert werden, die Entfernungsskala kann an jedem beliebigen Ort neu geeicht werden. Dies bedeutet, daß Kraftfelder erzeugt werden müssen, um der Welt lokale Eichsymmetrien auferlegen zu können.

Eine sehr tragfähige Eichsymmetrie entdeckten in den siebziger Jahren Steven WEINBERG und Abdus SALAM. Sie fanden, daß die elektromagnetische und die schwache Kraft, die unterschiedliche Eigenschaften zu haben scheinen, nur Auswirkungen einer einzelnen Kraft, der elektroschwachen Kraft, sind. Die schwache Kraft wird hier als *Eichfeld* beschrieben. Drei neue Kraftfelder sind erforderlich, um die geforderte Eichsymmetrie aufrechtzuerhalten. Somit gibt es *drei unterschiedliche Botenteilchen*.

Ein Hindernis war noch zu überwinden. Da die Natur der Eichfelder langreichweitig ist, die schwache Kraft aber kurze Reichweite besitzt, ergab sich eine Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment. Gelöst wurde dieses Problem durch die *spontane Symmetriebrechung*.

Kraftfelder können, so zeigte sich, nicht in einem Zustand verbleiben, wie er durch die Eichsymmetrie wiedergegeben wird, denn dieser ist instabil. Das Feld geht somit in einen stabilen Zustand über, der die Symmetrie bricht und das Botenteilchen mit Masse versieht. Um diese Symmetriebrechung zu erhalten, führten WEINBERG und SALAM ein zusätzliches Feld in die Theorie ein, das *Higgs-Feld* genannt wird. Durch die Koppelung der Eichfelder an das Higgs-Feld bekommen die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung, die *W-* und *Z-Bosonen*, ihre Masse. Elektromagnetismus und schwache Kraft konnten somit in einer einzigen Eichfeldtheorie zusammengefaßt werden. 1983 wurden die *W-* und *Z-*Teilchen experimentell entdeckt und somit die elektroschwache Theorie bestätigt.

Ermutigt durch die Erfolge von WEINBERG und SALAM versuchte man nunmehr, die elektroschwache Theorie mit der Theorie der starken Kraft zu vereinen. Letztere wurde vorerst als Eichtheorie formuliert, die unter dem Namen *Quantenchromodynamik* bekannt ist.

1973 publizierten Sheldon GLASHOW und Howard GEORGI eine Theorie, welche die elektroschwache Kraft mit der starken Gluonenkraft verschmolz. Sie wurde GET (Große Vereinheitlichungstheorie) ge-

nannt. Diese *Eichfeldtheorie* beschreibt eine Symmetrie, die nicht nur die Eichsymmetrien der Quantenchromodynamik und der elektroschwachen Kraft besitzt, sondern noch zwölf zusätzliche Kraftfelder entstehen läßt, die zwölf neuen Teilchen mit ungewöhnlichen Eigenschaften entsprechen. Diese 12 Quanten werden als *X-Teilchen* bezeichnet. Deren Masse soll etwa 10^{14} Protonenmassen entsprechen. Diese hätten u. a. die erstaunliche Eigenschaft, ein Proton mit einer Halbwertszeit von etwa 10^{31} Jahren zerfallen zu lassen. Bis jetzt wurde aber, trotz eingehender Suche, ein solcher Zerfallsprozeß noch nicht festgestellt. Ungeachtet dieses derzeitigen experimentellen Mißerfolges versucht man aber, die Vereinheitlichung noch weiter zu treiben und alle vier fundamentalen Kräfte in einer Theorie zu vereinigen.

b) Supersymmetrie

Fußend auf den Erfolgen, die man mit einer Eichsymmetrie bei der schwachen Kraft hatte, suchte man nach einer neuen Symmetrie und fand die *Supersymmetrie*. Diese vereinigt zwei Klassen von Teilchen, die *Bosonen*, Teilchen mit ganzzahligem Spin, und die *Fermionen*, Teilchen mit halbzahligem Spin. So sind alle Botenteilchen, also Teilchen, die Kräfte vermitteln, Bosonen und alle Quarks und Leptonen, also Teilchen, die mit Materie in Verbindung gebracht werden können, Fermionen. Bosonen versuchen zusammenzukommen, Fermionen sind Individualisten und meiden einander.

Supersymmetrische Operationen bewirken nun die Umwandlung eines Bosons in ein Fermion und umgekehrt. Zwei aufeinanderfolgende supersymmetrische Operationen bewirken jedoch eine Versetzung der Position im Raum, die Eichfeldnatur der Gravitation ist durch die Supersymmetrie beschreibbar. Die experimentelle Bestätigung dieser Theorie konnte aber bis jetzt noch nicht erbracht werden.

Das Bild einer Vereinheitlichung aller Wechselwirkungskräfte kann aber nicht nur über Eichsymmetrien, sondern auch von der geometrischen Seite her angegangen werden. A. EINSTEIN hatte gezeigt, daß die Gravitation eine Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit ist.

c) Geometrische Vereinheitlichung

Theodor KALUZA wollte genauso wie A. EINSTEIN den Elektromagnetismus mit der Gravitation vereinen. Deshalb griff er, zum Unterschied von EINSTEIN, zu einem *fünfdimensionalen Raum* und zeigte 1921, daß

sich das Gravitationsfeld in einem fünfdimensionalen Universum wie ein gewöhnliches gravitatives Feld zusammen mit dem Maxwell'schen elektromagnetischen Feld verhält, wenn man sich diese beiden Felder von der Perspektive der vierdimensionalen Raumzeit ansieht. Nun ist aber die 5. Dimension in unserer vierdimensionalen Raumzeit nicht bemerkbar.

Auf dieses Problem gab 1926 Oscar KLEIN (1894 – 1977) eine Antwort. Sie besagte, daß die zusätzliche Dimension mit einem Radius von etwa 10^{-34} m eingerollt wird und somit ein Punkt sich als Kreis darstellt. Eine Linie wird beim näheren Hinsehen daher zu einer Art Gartenschlauch. Die geringen Querschnittsabmessungen dieses Gartenschlauches machen es verständlich, warum diese Dimension bisher nicht festgestellt werden konnte. Diese Theorie geriet vorerst in Vergessenheit, wurde aber mit der Formulierung der *Großen Vereinheitlichungstheorie* (GET) und der *Supersymmetrie* wieder hervorgeholt und frisch modelliert.

In der neu zum Leben erweckten *Kaluza-Klein-Theorie* werden die bisher aufgefundenen Eichfeldsymmetrien zu geometrischen Symmetrien, die zusätzliche Raumdimensionen voraussetzen. Um alle Wechselwirkungskräfte in der neuen Kaluza-Klein-Theorie unterbringen zu können, ist ein *elfdimensionaler Raum* erforderlich, ausgestattet mit zehn Raumdimensionen und einer Zeitdimension. Sieben Raumdimensionen sind hierbei eingerollt, bilden eine siebendimensionale Kugel und sind somit nicht unmittelbar zugänglich. Im Rahmen der Theorie wird die Symmetriebrechung, die masselose Teilchen wiederum massiv werden läßt, dadurch erreicht, daß die siebendimensionale Kugel etwas gequetscht wird.

Eine Theorie, formuliert in elf Dimensionen, hat nun aber, da eine ungerade Zahl von Dimensionen vorliegt, den Nachteil, daß sie die Händigkeit in der Natur nicht richtig wiedergibt. Die schwache Kraft bringt eine Asymmetrie von links und rechts in die Physik hinein und dies ist zu berücksichtigen.

Dieser Nachteil wird durch die erst in den letzten Jahren weiter ausgebauten zehndimensionalen *Superstringtheorie* überwunden. Diese geht aus einer Theorie von Fäden, formuliert in den sechziger Jahren, hervor, mit der Quarkteilchen und Gluonen im Innern von Hadronen besser darstellbar waren. Mitte der siebziger Jahre wurde die Fadentheorie supersymmetrisch formuliert. Es stellte sich heraus, daß Quantisierungsanomalien nicht mehr auftraten, wenn eine $SO(32)$ - bzw. $E_8 \times E_8$ -Eichgruppe verwendet wurde. Die genannten Eichgruppen ent-

halten u. a. wiederum die bekannten Eichgruppen der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung. Die Superstringtheorie, die damit begonnen hatte, das Verhalten von Hadronen wiederzugeben, ist bereits zu einem stark forcierten Vereinheitlichungsprogramm angewachsen. Wird die Eichgruppe $E_8 \times E_8$ verwendet, dann weist diese spezielle Superstringtheorie auf ein Schattenuniversum neben unserem beobachtbaren Universum hin, die nur über die Gravitation miteinander verbunden sind. Ob diese Ansicht stimmt, wird die Zukunft weisen.

Die *Heim'sche Theorie* geht ebenfalls wie bei den zuletzt erwähnten Vereinheitlichungstheorien von der Idee einer Geometrisierung der Physik aus. Zum Unterschied von der elfdimensionalen Supergravitationstheorie bzw. zehndimensionalen Superstringtheorie wird vorerst die *vierdimensionale Raumzeit* durch die Hinzunahme eines *zweidimensionalen Raumes* zu einem sechsdimensionalen Raum erweitert. Ein Einrollen der Transkoordinaten findet aber nicht statt, sondern es werden die beiden Transkoordinaten in die uns zugängliche Raumzeit abgebildet. Die Eigenschaften der zwei Transkoordinaten sind nicht mehr raum- oder zeitartig, sondern haben *organisatorischen* Charakter. Die modifizierten Einstein'schen Feldgleichungen erweisen sich als Eigenwertgleichungen mit den Christoffelsymbolen als Variablen. Die verwendete Metrik wird dahingehend erweitert, daß der bisher zweistufige Fundamentaltensor vierstufig wird und somit eine reichhaltige Metrik es gestattet, aus den Lösungen der Eigenwertgleichungen ein Partikelspektrum zu erhalten, das nicht nur die Massen der bekannten Elementarpartikeln wiedergibt, sondern auch deren Quantenzahlsätze wie Spin, Isospin, Baryonenzahl und Seltsamkeit. Die Übereinstimmung mit den experimentellen Daten ist erstaunlich.

Ausgehend von dieser bereits veröffentlichten Theorie habe ich versucht, die Grundlagen seiner Theorie zu erweitern, die in einer sich in Vorbereitung befindlichen Schrift festgehalten sind.

10. Ansätze zu einer Physik komplexer Systeme

Die letztgenannten Theorien betrafen alle den ehrgeizigen theoretischen Versuch, Naturkräfte zu vereinen und eine vollständige Beschreibung aller subatomaren Teilchen zu liefern. Dieses Programm, das von der Hochenergiephysik her stammt und auch die Kosmologie umfaßt, besteht darin, nach den letzten Gesetzen zu suchen, die auf der untersten und einfachsten Ebene der physikalischen Beschreibung wirksam

sind. Im Falle eines Erfolges könnten die fundamentalen Einheiten, aus denen die Physik aufgebaut ist, aufgedeckt werden.

Während die *reduktionistische* Suche weitergeht, gibt es auch die ersten Versuche an der entgegengesetzten Front, an der Schnittstelle zwischen Physik und Biologie. Man möchte nicht herausbekommen, woraus die Dinge bestehen, sondern wie sie als integrierte Ganzheit funktionieren. Die Schlüsselbegriffe sind nicht Einfachheit, sondern *Komplexität*, nicht Hardware, sondern Organisation und Software. Diese Theorien der Organisation werden die Physik ebenfalls grundlegend verändern.

Die zentrale Frage besteht hier darin, welche fundamentalen Gesetze hinter dem vorerst unvernünftig erscheinenden Hang der Materie stehen, sich entgegen aller Wahrscheinlichkeit und entgegen dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre selbst zu organisieren und komplexe Strukturen zu bilden.

Es zeigt sich, daß es in weit von einem Gleichgewicht entfernten, offenen und nichtlinearen Systemen mit einem hohen Maß an Rückkopplung zu einer spontanen *Selbstorganisation* kommt. In der Natur sind solche Systeme der Regelfall, Gleichgewichtssysteme oder nahe dem Gleichgewicht befindliche Systeme thermodynamischer Art hingegen sind oft nur spezielle Idealisierungen. Es muß nicht sein, daß sich die Organisationsprinzipien höherer Ebene bei ihrer ordnenden Wirkung geheimnisvoller Kräfte bedienen, die kollektive Lenkung von Teilchen kann hier ausschließlich über bereits bekannte Kräfte erfolgen.

Dazu ist erforderlich, daß auf der tieferen Ebene die Kräfte nicht schon eindeutig determiniert sind. Dies ist insofern gegeben, weil der strikte *Determinismus* in der Physik sowieso keinen Platz mehr einnimmt, wie einerseits die *Quantentheorie* und andererseits die *Chaostheorie* zeigt. Letztere gibt an, daß die Entwicklung komplexer Systeme oft überaus empfindlich gegenüber den Anfangsbedingungen ist und sie sich daher auf eine im wesentlichen unvorhersagbare Weise verhält. So geht z. B. aus Gleichungen, welche die Zirkulationsbewegungen in der Atmosphäre wiedergeben, hervor, daß bereits ein Flügel-schlag eines Schmetterlings zu einem Wirbelsturm führen kann.

Man muß die Möglichkeit in Betracht ziehen, daß es nicht Hardware-, sondern *Softwaregesetze* in der Natur gibt, die das Verhalten von Organisation, Information und Komplexität beschreiben. Die Physik komplexer Systeme wird sich dann nach neuen Gesetzen der Biologie zu richten haben und nicht umgekehrt. Die bisher bekannte Physik dieser Systeme wird sich damit aber radikal ändern müssen.

Bibliographie

- DAVIES, Paul: Die Urkraft. – München: dtv, 1990
 DAVIES, P.: Prinzip Chaos. – München: Goldmann, 1991
 KANITSCHKEIDER, Bernulf: Das Weltbild Albert Einsteins. – München: C. H. Beck, 1988
 PRIGOGINE, Ilya / STENGERS, Isabelle: Dialog mit der Natur. – München: Piper, 1990
 SEXL, Roman U.: Was die Welt zusammenhält. – Frankfurt; Berlin; Wien: Ullstein, 1984
 WEIZSÄCKER, Carl F. v.: Aufbau der Physik. – München; Wien: Hanser, 1986
 WEIZSÄCKER, C. F. v.: Zum Weltbild der Physik. – 13. Aufl. – Stuttgart: Hirzel, 1990