

Nr. 19

Die Erhaltungsgesetze der Physik

Rede, gehalten beim Antritt des Rektorats am 5. Mai 1965 von dem
ordentlichen Professor der Physik

Dr. Walter Rentschler



VERLAG EUGEN ULMER STUTTGART

Aus weltanschaulichen Gründen bewegte die Suche nach einem Ordnungsprinzip für das Weltgeschehen nach irgend etwas „Unvergänglichem“, „Ewigem“, „Bleibendem“ schon die Philosophen des Altertums. Die Idee der Erhaltung ist eine Folge der Auffassung, „daß die Schöpfung in sich vollendet war und daß nichts Neues hinzugeschaffen, aber auch nichts Erschaffenes vernichtet werden kann“ (F. STRUNZ) (1). Entsprechend der unterschiedlichen Naturauffassung der verschiedenen Philosophenschulen und der einzelnen Philosophen ist das, was unveränderlich erhalten bleiben soll, immer wieder etwas anderes, zunächst meist mehr oder weniger Abstraktes.

So ist bei der eleatischen Schule (XENOPHANES, geb. 565 v. Chr.) „die unveränderte Einheit des Seins“ der Ausdruck des Erhaltungsgedankens, und bei HERAKLIT (544–483 v. Chr.) heißt es: „Alles ist Austausch des Feuers und das Feuer Austausch von allem, gerade wie Waren für Gold und Gold für Waren eingetauscht werden“ (2). Auch EMPEDOKLES (495–435 v. Chr.) lehrte, daß „etwas Bestehendes niemals vernichtet werden könne“ (3). Die determinierte materialistische Naturauffassung der Atomisten, daß „alles, was geschehen sei, was ist und was künftig sein wird, sowohl die Atome und ihre Eigenschaften als auch ihre Bewegung schon von der Schöpfung an enthalten gewesen sei“ gipfelt in dem oft zitierten Satz DEMOKRITS (ca. 460–ca. 370 v. Chr.) „Nichts wird aus Nichts und Nichts vergeht zu Nichts“ (4).

Diese Erhaltungsideen sind frühe Vorläufer der Erhaltungsgesetze der modernen Naturwissenschaft, und wie auch in anderer Beziehung kommt DEMOKRIT den neueren naturwissenschaftlichen Auffassungen näher als irgendein anderer Philosoph des Altertums. Seine Naturanschauung ist die geschlossenste und widerspruchloseste aller griechischen Naturphilosophen.

Wenn sich die Ansichten der Atomisten trotzdem nicht durchsetzen konnten, so lag dies an der Art, wie damals Naturphilosophie betrieben wurde. Die später so erfolgreiche Methode, durch gezielte Experimente die Naturvorgänge zu erforschen und die Beobachtungen durch eine möglichst exakte Theorie zu beschreiben, lag allen Philosophen des Altertums fern. Nicht die Erscheinungen der Natur selbst entschieden über die Richtigkeit irgendeiner Hypothese, entscheidend war die Autorität des Philosophen der sie vertrat und dessen Redegewandtheit.

So kam es, daß spekulative, im Grunde wenig naturwissenschaftliche Anschauungen über den Aufbau der Stoffe aus den vier Elementen „Erde, Wasser, Luft und Feuer“, die auf EMPEDOKLES zurückgehen

und von ARISTOTELES (384–322 v. Chr.) übernommen wurden, wie auch des letzteren falsche Anschauungen über physikalische Vorgänge und ihre Ursachen, für richtig gehalten wurden und für fast 2 Jahrtausende der Hemmschuh für jeden naturwissenschaftlichen Fortschritt waren.

Neben der Existenz der verschiedenartigen Stoffe gaben Bewegungsvorgänge, und hier vor allem die Bewegung im Kosmos, den Philosophen von jeher zu denken. Wurden ursprünglich die Gestirne selbst mit den Göttern identifiziert, die auf ihren Wagen oder in ihren Schiffen über das Himmelsgewölbe fuhren, so waren später z. B. bei ARISTOTELES Gottheiten notwendig, um die Himmelsphären in dauernder Bewegung zu halten.

JOHANNES PHILOPONOS, ein christlich-alexandrinischer Philosoph postulierte im 6. Jahrhundert n. Chr., daß ein einmaliger Anstoß bei der Schöpfung, ein „Impetus“, der dann für alle Ewigkeit erhalten bleibt, die Ursache der Bewegungen der Gestirne sei. Er übertrug damit die Idee des Demokrit von der Unvergänglichkeit der Bewegungen der Atome in den Bereich des Kosmos. Da aber die immer noch die Naturphilosophie beherrschenden Aristoteliker die Existenz eines luftleeren Raumes leugneten und daraus schlossen, daß wegen des unvermeidlichen Luftwiderstandes ein solcher „Impetus“ sehr rasch aufgebraucht werden müßte, fand die Impetustheorie kaum Anhänger und wurde von der Kirche als ketzerisch verurteilt. Damals und selbst noch im 13. Jahrhundert bei THOMAS VON AQUIN war die Notwendigkeit eines dauernd in das kosmische Geschehen eingreifenden „höchsten Bewegers“ ein wichtiger Teil des Gottesbeweises, auf den nicht verzichtet werden konnte.

Erst nach der Überwindung der von den Scholastikern in die abendländische Wissenschaft und in die kirchliche Glaubenslehre übernommenen und damit zu Glaubensdogmen gewordenen falschen Ansichten der aristotelischen Schule durch Naturforscher, wie NIKOLAUS KOPERNIKUS, JOHANNES KEPLER, GALILEO GALILEI, WILLIAM GILBERT u. a., um 1600 konnten die Erhaltungsgesetze exakt formuliert werden.

Allerdings sind es nun nicht mehr weltanschauliche Gründe, die zur Aufstellung der Erhaltungsgesetze führen, sondern das Bestreben, die Beobachtungen und die experimentellen Ergebnisse durch möglichst umfassende Gesetze quantitativ zu beschreiben.

Der erste dieser Erhaltungssätze ist der auf JOHANN BAPTIST VAN HELMONT (1572–1644) zurückgehende, allerdings erst nach der Einführung der Wägemethoden in die Chemie durch ANTOINE LAURENT LAVOISIER im 18. Jahrhundert präzisierte Satz von der Erhaltung des Stoffes. Der Begriff „Stoff“ war damals allerdings noch nicht scharf abgegrenzt; neben der wägbaren, ponderablen Materie wurden auch Wärme, Licht, Elektrizität und Magnetismus als unwägbare, imponderable Stoffe angesehen. „Calorique“ und „lumière“, Wärme und Licht, stehen bei Lavoisier an der Spitze seiner Tabelle der Elemente und

werden von ihm mit in diesen Satz von der Erhaltung des Stoffes einbezogen.

Gegen Ende des 13. Jahrhunderts wurde auch die „Impetustheorie“ durch WILLIAM VON OCKHAM in Oxford und JOHANNES BURIDANUS, Rektor der Pariser Universität, wieder aufgegriffen. Besonders der letztere ist mit seiner Auffassung, daß der einem Körper erteilte „Impetus“ seiner Masse und seiner Anfangsgeschwindigkeit proportional ist und seiner Ansicht, daß der Impetus der Gestirne deshalb nicht abnehme, weil es im Kosmos eben keinen Luftwiderstand gebe, den Erhaltungssätzen der Bewegung schon ziemlich nahe gewesen.

Wie so häufig in der Scholastik blieb es bei Ansätzen und durch Streitgespräche über das „Wesen“ des Impetus wurde in der Folgezeit der gute Kern der Sache wieder vollkommen zerredet und die Theorie geriet wieder in Vergessenheit.

Erst die mathematisch deduktiven Überlegungen RENÉ DESCARTES führten in der Mitte des 17. Jahrhunderts zum modernen Prinzip von der Erhaltung der Bewegungsgröße oder, wie man heute sagt, der Erhaltung des Impulses: In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe der Impulse aller beteiligten Körper konstant. Als Impuls eines Körpers ist dabei das Produkt aus dessen Masse und Geschwindigkeit definiert. Dieses allgemeine Prinzip umfaßt einige andere, teilweise schon früher bekannte, für Bewegungsvorgänge gültige Erhaltungssätze, so z. B. das Trägheitsgesetz, den Satz von der Erhaltung der Relativgeschwindigkeit beim elastischen Stoß, den Satz von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und das zweite Keplersche Gesetz, den Flächensatz. Für Drehbewegungen gilt der analoge Satz von der Erhaltung des Drehimpulses.

Unter bestimmten Voraussetzungen gilt auch für eine andere mechanische Größe, richtiger zunächst für die Summe zweier Größen ein Erhaltungssatz. Die eine dieser Größen wurde früher meist, in unklarer Definition, als „Kraft“ oder „lebendige Kraft“ eines bewegten Körpers bezeichnet, sie ist identisch mit der „kinetischen Energie“ oder Bewegungsenergie unseres heutigen Sprachgebrauchs (und zahlenmäßig das halbe Produkt aus der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers). Die zweite Größe ist die Arbeit, die man aufwenden muß, um einen Körper im Schwerfeld der Erde auf eine bestimmte Höhe zu heben und die ihn dann befähigt, bei seinem Fall „lebendige Kraft“ zu entwickeln. GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ nannte diese Größe „potentia“, JULIUS ROBERT MAYER „Fallkraft“; wir nennen sie heute die potentielle Energie oder die Energie der Lage.

In ersten Ansätzen schon 1638 bei GALILEO GALILEI in den Discorsi bei der Beschreibung seiner Fallversuche auf der schiefen Ebene und seinen Pendelversuchen vorhanden, wird im Jahre 1673 von CHRISTIAN HUYGENS (1629–1695) der Satz ausgesprochen, daß bei reibungsfreier Bewegung im Schwerfeld der Erde die Summe der lebendigen Kraft und der Hubarbeit konstant ist. 1748 formuliert darauf gründend

DANIEL BERNOULLI (1700–1782) das allgemeine Prinzip von der Erhaltung der „lebendigen Kraft“, das für ein abgeschlossenes System bei Vernachlässigung der Reibung gilt: Bei Bewegungsvorgängen ist die Summe der Bewegungsenergie und der Lagenenergie konstant. Es ist dies die für rein mechanische Vorgänge gültige Form unseres heutigen Satzes von der Erhaltung der Energie.

Die Erfahrung, daß durch Reibung gegeneinander bewegter Körper die Bewegung abgebremst wird, dabei aber Wärme entsteht, führt den Heilbronner Arzt JULIUS ROBERT MAYER (1814–1878) etwa 100 Jahre später, 1842, zu der Überzeugung, daß auch Wärme eine Form der „Kraft“ ist und in den Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft mit einzubeziehen ist. Unter „Kraft“ versteht MAYER, wie auch 5 Jahre später noch HERMANN HELMHOLTZ in seiner Arbeit „Über die Erhaltung der Kraft“, das, was wir heute Energie nennen. Dessen müssen wir uns bei den im folgenden zitierten Sätzen aus MAYERSchen Arbeiten bewußt sein. MAYER gibt, was für seine spätere Anerkennung besonders wichtig ist, schon in seiner ersten 1842 in Liebigs Annalen der Chemie und Pharmazie veröffentlichten Arbeit „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ (5) einen Zahlenwert für den Umrechnungsfaktor von mechanischer Energie in Wärmeenergie, für das sogenannte mechanische Wärmeäquivalent an. Daß dieser Zahlenwert um ca. 15% zu klein war, lag nicht etwa daran, daß MAYERS Grundgedanken oder Berechnungsmethoden falsch waren, sondern an der Ungenauigkeit der Messungen auf die er zurückgreifen mußte.

In seiner zweiten Arbeit, die 1845 als Monographie unter dem Titel „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel, ein Beitrag zur Naturkunde“ erscheint, dehnt ROBERT MAYER den Energiesatz weiter aus (6). Er schreibt: „Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine konstante Größe.“ Als Hauptformen der physikalischen Kraft zählt er auf: „Fallkraft“, „einfache und vibrierende Bewegung“, „Wärme“, „Magnetismus“, „Elektrizität“ und das „Chemische Getrenntsein bzw. Chemische Verbundensein bestimmter Materien“. In unseren heutigen Begriffen ausgedrückt sind dies: Energie der Lage, Energie der Bewegung, Strahlungsenergie, Wärmeenergie, elektrische und magnetische Energie und chemische Bindungsenergie. Er bringt eine ganze Reihe von Beispielen aus Physik, Chemie und Physiologie für die „Metamorphose“ oder die „Verwandlungen der Kräfte“, d. h. die Umwandlung der Energie von einer Form in eine andere.

Nach seiner Meinung „gibt es in Wahrheit nur eine einzige Kraft. In ewigem Wechsel kreist dieselbe in der toten wie in der lebendigen Natur. Dort und hier kein Vorgang ohne Formveränderung der Kraft“. ROBERT MAYER vergleicht diese „Erhaltung der Kraft“ mit der „Erhaltung der Materie“ in der Chemie, wenn er schreibt: „Die quantitative Unveränderlichkeit des Gegebenen ist ein oberstes Naturgesetz, das sich auf gleiche Weise über Kraft und Materie erstreckt.“

„Was die Chemie in Beziehung auf Materie, das hat die Physik in Beziehung auf Kraft zu leisten.“

Er ist überzeugt davon, in der „Kraft“ (bzw. Energie) die Grundgröße erkannt zu haben, die alles physikalische Geschehen beherrscht, während es ihm noch zweifelhaft erscheint, „ob es in zukünftiger Zeit je gelingen werde, die zahlreichen chemischen Grundstoffe ineinander zu verwandeln, sie auf wenige Grundstoffe oder gar auf einen einzigen Grundstoff zurückzuführen“.

Wir wollen hier nicht näher auf die großen Schwierigkeiten eingehen, die der Anerkennung der Gedanken ROBERT MAYERS im Wege standen. Es begann damit, daß die meisten Physiker von der Existenz seiner unter wenig glücklichen Titeln veröffentlichten Arbeiten zunächst kaum Kenntnis nahmen, so daß es zu den jahrelangen Prioritätsstreitigkeiten mit JAMES PRESCOTT JOULE und HERMANN HELMHOLTZ kommen konnte, die erst Mitte der fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts endgültig zugunsten ROBERT MAYERS entschieden wurden.

Wir wollen auch den Gründen, die zu dieser Entwicklung führten, nicht im einzelnen nachgehen. Zum Teil lagen sie sicher in der Art der MAYERSchen Arbeiten selbst: in seiner etwas romantischen unphysikalischen Sprache und der Verwendung unklarer und manchmal falscher physikalischer Begriffe, zum Teil in dem Bemühen der Physiker, sich frei von jeder Spekulation zu halten, einer Folge der schlechten Erfahrung, die sie mit der HEGELSchen und SCHELLINGSchen Naturphilosophie gemacht hatten. An der großen Leistung ROBERT MAYERS für die gesamte Naturwissenschaft bestand gegen Ende des 19. Jahrhunderts jedoch kein Zweifel mehr. Seine Arbeiten aus den Jahren 1842 und 1845 enthalten die Grundkonzeption des wichtigsten Erhaltungssatzes: des Prinzips von der Erhaltung der Energie.

Zunächst schien es so, daß der Satz von der Erhaltung der Energie zur Krönung der mechanistischen Weltauffassung führen würde. Er gab letztlich den Anstoß zur kinetischen Wärmetheorie, zur Zurückführung der Wärmelehre auf die Bewegung der Moleküle und damit auf die Mechanik. Alle Versuche, auch die anderen Gebiete der Physik, die Elektrizität, den Magnetismus und die Optik auf die Mechanik zurückzuführen, scheiterten jedoch. Die Theorie der Elektrodynamik wurde unabhängig von der Mechanik durch JAMES CLERK MAXWELL (1831–1879) entwickelt. An die Stelle des Gesetzes von der Erhaltung der Masse tritt in der Elektrodynamik das Gesetz von der Erhaltung der elektrischen Ladung. Der Satz von der Erhaltung der Energie behält aber auch in der Elektrodynamik seine volle Gültigkeit. Er stellt darüber hinaus die Verbindung zwischen Mechanik und Elektrodynamik her. Gerade hier zeigte sich deutlich seine Eigenständigkeit und seine über die Mechanik hinausgehende Bedeutung.

Zum ersten Mal in der Geschichte der Naturwissenschaften wurde von ROBERT MAYER damit ein Prinzip aufgestellt, das für alle Gebiete

der Physik gültig ist und sie miteinander verbindet. Es wurde, wie MAX PLANCK sagt, „in die Zahl der Axiome aufgenommen, die der ferneren Forschung als Grundlage und Ausgangspunkt dienen ... von jetzt an war man im Besitz eines Prinzips, das auf allen bekannten Gebieten durch sorgfältige Untersuchungen erprobt, nun auch für gänzlich unbekannte und unerforschte Regionen einen vortrefflichen Führer abgab“ (7). Wie schon ROBERT MAYER erkannte, ist dieses Erhaltungsprinzip aber nicht nur für die Physik und die Technik, sondern für die gesamten Naturwissenschaften von grundlegender Bedeutung. „Von dieser Zeit ab datiert für die Entwicklung aller exakten Naturwissenschaften eine neue Epoche“, sagte einmal MAX PLANCK, und nach CARL FRIEDRICH VON WEIZSÄCKER „ist das Energieprinzip der erste Schritt zu einer grundsätzlichen Unterwerfung anderer Bereiche unter die physikalische Denkweise“, „es ist ein Kernstück des physikalischen Weltbildes“ (8).

Im Gegensatz zum Satz von der Erhaltung des Impulses, der eine Folge der Grundprinzipien der Mechanik ist, ist der Satz von der Erhaltung der Energie, ein reiner Erfahrungssatz.

Umso verwunderlicher ist es, daß dieser Erfahrungssatz auch nach der raschen Entwicklung der Physik im 20. Jahrhundert heute noch ebenso uneingeschränkte Gültigkeit besitzt wie vorher. Ja man kann fast sagen, daß sein Gültigkeitsbereich, durch einen umfassenden Energiebegriff, noch ausgedehnt wurde, während derjenige vieler anderer grundlegender und exakt fundierter Prinzipien sich Einschränkungen gefallen lassen mußte.

Der Bedeutung der Erhaltungsgesetze, insbesondere des Satzes von der Erhaltung der Energie, für die modernere Entwicklung der Physik wollen wir uns nun noch zuwenden. Einige experimentelle Ergebnisse, die gegen Ende des 19. Jahrhunderts erhalten wurden, als die physikalische Forschung einerseits in das Gebiet großer Geschwindigkeiten und andererseits in den atomaren Bereich vordrang, konnten mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht in Einklang gebracht werden.

Die Relativitätstheorie ALBERT EINSTEINS (1879–1955) und die Quantentheorie MAX PLANCKS (1858–1947), beide um die Jahrhundertwende entstanden und auf den erwähnten experimentellen Ergebnissen fußend, leiteten die Entwicklung der Physik über den klassischen Bereich hinaus ein.

Die Relativitätstheorie brachte für wichtige Gesetze der klassischen Physik, so z. B. für das Galileische Additionsgesetz für Geschwindigkeiten, den Satz von der Erhaltung des Stoffes und den Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft, also die mechanische Form des Energiesatzes, Einschränkungen ihres Geltungsbereiches. Diese klassischen Gesetze sind nur bei Geschwindigkeiten, die klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind, richtig. Bei Geschwindigkeiten in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit gelten neue relativistische Gesetze, die jedoch die klassischen Gesetze als Grenzfall enthalten. Eine wich-

tige Folgerung aus diesen Gesetzen ist die experimentell an rasch bewegten Teilchen nachweisbare Tatsache, daß der Lichtgeschwindigkeit der Charakter einer unüberschreitbaren Grenzggeschwindigkeit zukommt.

Die beiden klassischen Erhaltungssätze für den Stoff und die Energie gehen in einen umfassenden relativistischen Erhaltungssatz über, bei dem Masse und Energie als äquivalente Erhaltungsgrößen fungieren. Diese Äquivalenz von Masse und Energie ist das bedeutungsvollste und weittragendste Ergebnis der Relativitätstheorie überhaupt. Energie und Masse, „Kraft“ und „Materie“, wie ROBERT MAYER sagte, sind nicht wie er glaubte zwei sich entsprechende Begriffe der Physik einerseits und der Chemie andererseits, sondern zwei verschiedene Formen ein und derselben Erhaltungsgröße.

Die Masse ist als weitere Energieform aufzufassen, und umgekehrt hat Energie auch die Eigenschaften einer Masse, sie ist wägbare und träge. Der Umrechnungsfaktor, das Massen-Energieäquivalent ist das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, also eine sehr große Zahl. Einer kleinen Masse entspricht eine sehr große Energie, umgekehrt aber erst einem sehr großen Energiebetrag eine praktisch wägbare Masse.

Um von dieser Äquivalenz einen Begriff zu geben, möchte ich hier doch zwei Zahlenbeispiele bringen: Einer Masse von 1 Gramm entspricht eine Energie von 25 Millionen Kilowattstunden, dies ist etwa die Energie, die von den Elektr.-Werken der Stadt Stuttgart in einer Woche erzeugt wird (in Geld ausgedrückt etwa 2,5 Millionen Mark). Andererseits ist die Hubarbeit, die man aufwenden müßte, um das ganze Bodenseewasser 250 m hochzuheben und damit die Energie der Lage, die dann in diesem höher gelegenen Bodensee gespeichert wäre, äquivalent einer Masse von 1 kg. Die prozentuale Massenzunahme durch diese Energiezufuhr ist 2 Billionstel ‰ also unmeßbar klein. Auch die Bildungsenergien bei chemischen Vorgängen entziehen sich dem Nachweis durch Massenbestimmung, da die entsprechenden Massenänderungen nur in der Gegend von 1millionstel Prozent der beteiligten Massen und damit weit unter der Nachweisgrenze liegen. Der Satz von der Erhaltung des Stoffes gilt daher im klassischen Bereich der Physik und der Chemie innerhalb der Meßgenauigkeit auch heute noch. Anders dagegen ist es in der Kernphysik: Als man mit den modernen Massenspektrographen die Massen von Einzelatomen sehr genau bestimmen konnte, stellte sich heraus, daß die Masse der Kernbausteine Proton und Neutron, wenn sie in einem Atomkern eingebaut sind, um etwa 0,8 ‰ geringer ist als diejenige der freien Kernbausteine. Ein Kernbaustein kann einen Atomkern nur verlassen, wenn ihm die fehlende Masse durch eine äquivalente Energiezufuhr ersetzt wird. Die Massendifferenz ist daher ein direktes Maß für die Bindungsenergie des Kernbausteins. Die Masse eines Atomkerns ist also kleiner als die Summe der Massen der in ihm gebundenen Kernbausteine. Der Massendefekt beträgt ebenfalls etwa

0,8% der Masse des Atomkerns und ist ein Maß für die in dem Kern steckende Bindungsenergie, die etwa um das Millionenfache größer ist als die Bindungsenergien bei chemischen Reaktionen. Die diesen Massendefekten, oder einem Teil davon äquivalenten Energiemengen werden bei Kernprozessen umgesetzt.

Das, was der Mensch seit ca. 20 Jahren in den Kernreaktoren und Kernkraftwerken mit großem technischen Aufwand bewerkstelligt und wirtschaftlich ausnützt, die Umwandlung von Massenenergie in andere Energieformen spielt sich, wie man heute weiß, in den Fixsternen und damit auch in unserer Sonne seit Milliarden von Jahren ab.

Die Energiebilanz der Sonne und der Sterne ist ein altes Problem der Astrophysik, das besonders brennend wurde, als man exaktere Angaben über das Alter unserer Erde und des Sonnensystems machen konnte. Heute ist man davon überzeugt, daß das Alter unseres Sonnensystems ca. 10 Milliarden Jahre beträgt, und man weiß auch, daß die Strahlung der Sonne und daher auch ihre Temperatur seit vielen Millionen Jahren zumindest größenordnungsmäßig gleichgeblieben ist. Die riesigen Energiemengen, die die Sonne ausstrahlt, müssen daher dauernd aus einer anderen Energiequelle ersetzt werden.

Schon ROBERT MAYER machte sich über die Energiebilanz der Sonne Gedanken. In seinen „Beiträgen zur Dynamik des Himmels“ stellt er die Hypothese auf, daß als Energiequelle die Bewegungsenergie der auf die Sonne fallenden Meteore und Meteoriten in Frage kommen könne (9). Aber weder damit noch mit anderen in der Folgezeit vorgeschlagenen Prozessen könnte die ausgestrahlte Energie auch nur annähernd ersetzt werden. Heute nimmt man als sicher an, daß Kernprozesse, vor allem die Fusion von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen im Innern der Sonne stattfinden und die dabei freiwerdende Massenenergie die Quelle für die Strahlungsenergie ist.

Noch wesentlich größere Energiemengen würde man erhalten, wenn nicht nur der Massendefekt, sondern die ganze Masse eines Atomkernes in Energie umgewandelt werden könnte. Eine solche vollkommene Umwandlung der Masse in Strahlungsenergie konnte man bisher aber nur bei Elementarteilchen beobachten, worauf wir noch zurückkommen werden.

Auch die Quantentheorie hat zunächst eine Wandlung und Erweiterung des Energiebegriffs mit sich gebracht. Experimentelle Ergebnisse bei der Messung der spektralen Energieverteilung der Wärmestrahlung und beim lichtelektrischen Effekt beschäftigten die Physiker gegen Ende des vergangenen Jahrhunderts sehr stark, da deren Deutung mit den klassischen Gesetzen nicht möglich war und, zumindest für die Strahlungsenergie, Widersprüche zum Energieerhaltungssatz auftraten.

MAX PLANCK gelang es im Jahre 1900 für die Energieverteilung der Wärmestrahlung ein Gesetz aufzustellen, das die neuesten Meßergebnisse genau wiedergab und nicht im Widerspruch zum Energieerhal-

tungssatz stand. Allerdings mußte er die vollkommen neuartige Annahme machen, daß die Strahlungsenergie nicht kontinuierlich unterteilbar ist, sondern aus kleinen Strahlungs- oder Energiequanten besteht, deren Energieinhalt von der Art der Strahlung abhängig ist.

Diese Grundannahme der Quantentheorie erlaubte auch eine plausible Deutung des lichtelektrischen Effektes. Messungen von PHILIPP LENARD hatten ergeben, daß die kinetische Energie der dabei durch Strahlung aus Materie ausgelösten Elektronen überraschenderweise vollkommen unabhängig von der Intensität und damit nach den Gesetzen der klassischen Physik von der Energie der auftreffenden Strahlung ist. Dagegen zeigte sich, daß die Elektronenenergie abhängig von der Art der Strahlung (also etwa der Farbe des Lichts) ist und daß die Zahl der ausgelösten Elektronen der Intensität der Strahlung proportional ist.

Diese Ergebnisse, die zunächst dem Energiesatz zu widersprechen schienen, sind, wie ALBERT EINSTEIN 1905 gezeigt hat, sofort verständlich, wenn man die von PLANCK eingeführte Aufteilung der Strahlungsenergie in Quanten übernimmt und annimmt, daß in einem „Elementarvorgang“ jedes auftreffende Strahlungsquant oder Photon seine Energie auf ein Elektron überträgt, wobei der Energieerhaltungssatz unter Berücksichtigung der Ablösearbeit der Elektronen streng gültig ist. Bei einheitlicher Strahlung haben alle auftreffenden Photonen und damit auch alle ausgelösten Elektronen eine einheitliche Energie. Die Intensität der Strahlung ist der Zahl der auftreffenden Photonen und daher auch der Zahl der ausgelösten Elektronen proportional. Beide Aussagen stimmen mit den Beobachtungen überein. Messungen der kinetischen Energie der ausgelösten Elektronen erlauben die Bestimmung der Photonen-Energie für die verschiedenen Strahlungsarten. Der Satz von der Erhaltung der Energie gilt hierbei nicht nur für den Einzelvorgang sondern auch für die Summe aller Einzelprozesse. Die Gesamtenergie der auftreffenden Strahlung findet sich, bis auf die Ablösearbeit, in der kinetischen Energie der Gesamtheit der ausgelösten Elektronen wieder.

Während in der klassischen Physik die Strahlungsenergie allein ein Maß für die Intensität, also die Quantität der Strahlung ist, ist sie in der Quantentheorie, durch die Aufteilung in einheitliche Energiequanten, ein Maß für Qualität und Quantität. Die gleiche Gesamtenergie kann sich auf wenige Photonen mit großer Photonenenergie oder auf viele Photonen mit kleiner Photonenenergie verteilen.

Da nach dem Äquivalenzprinzip jeder Energie und daher auch der Energie eines Photons eine Masse entspricht, besitzen die mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Photonen auch einen Impuls. Für sie gilt daher neben dem Energieerhaltungssatz auch der Impulserhaltungssatz, was durch eine ganze Reihe von experimentellen Ergebnissen, erwähnt sei hier nur der Compton-Effekt, bewiesen ist.

Wieder ist es so, daß im makrophysikalischen Bereich durch die Quantentheorie nichts an den Gesetzen geändert wird. Die Energiequanten sind, verglichen mit den Energien, die dort umgesetzt werden, so klein, bzw. die Zahl der mitwirkenden Photonen so groß, daß man in der Makrophysik von der Struktur der Energie nichts bemerkt.

Die zur Deutung der Erscheinungen bei der quantenhaften Emission und Absorption der Strahlungsenergie entwickelte Quantentheorie wurde zur Grundlage der von NIELS BOHR, WERNER HEISENBERG, ERWIN SCHRÖDINGER u. a. entwickelten modernen Quantenmechanik der Atome. Da die Emission der Strahlung durch die Atome, wie die Beobachtungen zeigen, in Form von Energiequanten erfolgt, deren Energieinhalt für die Atomsorte typisch ist, kann auch der Energieinhalt der Atome selbst nur diskontinuierlich veränderlich sein. Die Energie eines Atoms ändert sich sprunghaft, wenn ein Photon bestimmter Energie von ihm ausgesandt oder im Falle der Absorption von ihm aufgenommen wird. Dieser Zusammenhang zwischen der Energie der emittierten Photonen und den Energiezuständen der Atome ist die wichtigste Erkenntnisquelle für unser Wissen vom Bau der Atome.

Es würde zu weit führen, hier an dieser Stelle über weitere Einzelheiten der Quantenmechanik zu sprechen, sie ist zusammen mit der Relativitätstheorie die Grundlage der modernen Theorie der Elementarteilchen. Auch in diesem Bereich der Physik ist bisher keine Erscheinung bekannt geworden, die eine Aufgabe eines der alten Erhaltungssätze notwendig gemacht hätte. Neben die Erhaltungssätze der Energie, des Impulses, der Masse und der elektrischen Ladung treten hier noch einige andere speziellere, vielleicht auch nur vorläufige, Erhaltungssätze für eine ganze Reihe von Teilcheneigenschaften, wie die Baryonen- und Leptonenzahl, den Spin und den Isospin oder für bestimmte Symmetrieeigenschaften, wie z. B. die sogenannte Parität.

Ein einfaches Beispiel für die Gültigkeit der Erhaltungssätze ist die schon vorher zitierte Umwandlung der Masse von Elementarteilchen in Strahlungsenergie, z. B. die Zerstrahlung von Elektronen. Treffen ein positives und ein negatives Elektron zusammen, so geht unter Ausgleich ihrer entgegengesetzten Ladung ihre gesamte Massenergie in Strahlungsenergie über. Es entstehen dabei zwei gleiche nach entgegengesetzter Richtung weglaufende Photonen, deren Energie genau der Masse der Elektronen äquivalent ist. Bei diesem Vorgang gilt neben dem Energieerhaltungssatz der Satz von der Erhaltung der Ladung, die Sätze von der Erhaltung der anderen Teilcheneigenschaften, und der Impulserhaltungssatz. Auf letzteren ist die Aufspaltung der Energie auf zwei Photonen zurückzuführen.

Auch der umgekehrte Vorgang, die Umwandlung von Strahlungsenergie in Masse findet in der Umgebung von Atomkernen statt. Es entstehen dabei immer zwei Elementarteilchen mit gleicher Masse

aber entgegengesetzten sonstigen Eigenschaften, z. B. ein positives und negatives Elektron. Da bei diesem Vorgang, den man auch Paarbildung nennt, die Masse der beiden Elementarteilchen neu gebildet wird, muß das Photon mindestens die den Massen der beiden Teilchen äquivalente Energie besitzen.

Durch diese und viele andere Beobachtungen ist man von der Gültigkeit der Erhaltungssätze so überzeugt, daß man, um neue Beobachtungen zu erklären, lieber neue Elementarteilchen mit den notwendigen Eigenschaften postuliert, als die Erhaltungssätze zu verwerfen. Die Erfahrung, daß im Verlauf der weiteren Forschung diese postulierten Teilchen dann auch meist gefunden werden, ist ein Beweis für die Richtigkeit des Vorgehens und zeigt die praktische Nützlichkeit der Erhaltungsgesetze für die Aufstellung neuer Theorien.

Ein Beispiel soll dies noch erläutern: Beim radioaktiven β -Zerfall geht im Atomkern ein Neutron in ein Proton über, unsere Beobachtungsgeräte registrieren ein vom Atom weglaufendes Elektron. Der Satz von der Erhaltung der Ladung ist also gültig, denn es entsteht bei diesem Vorgang im Kern eine positive Ladung und die gleichgroße negative des weglaufenden Elektrons. Die Summe der Ladungen der beteiligten Teilchen ist vorher und nachher Null. Obwohl nun beim Zerfall eines einheitlichen radioaktiven Stoffes alle zerfallenden Kerne die gleiche scharf definierte Energiemenge verlieren, ist die kinetische Energie der ausgestoßenen Elektronen sehr unterschiedlich, sie variiert zwischen Null und der Energie, die der Kern bei diesem Zerfall verliert. Entgegen der zunächst z. B. auch von BOHR ausgesprochenen Vermutung, daß bei diesem Vorgang der Energiesatz nicht gelte und Energie verlorengelasse, schlug WOLFGANG PAULI vor, ein elektrisch neutrales, sehr leichtes Teilchen, das Neutrino, zu postulieren, das die Differenzmenge mit sich fortträgt, aber wegen seiner kleinen Masse und des Fehlens einer Ladung unbeobachtbar bleibt. Beim β -Zerfall sollte also gleichzeitig ein Elektron und ein Neutrino ausgestoßen werden, wobei sich der einheitliche umgesetzte Energiebetrag in unterschiedlicher Weise auf beide verteilt. Diese Theorie des β -Zerfalls, die zunächst nur darauf begründet war, daß der Energieerhaltungssatz seine Gültigkeit behält, wurde erst Jahre später durch die Entdeckung und den Nachweis des hypothetischen Neutrinos experimentell bewiesen. Auch der Spinerhaltungssatz ist beim β -Zerfall nach diesem Schema gültig, während dies nicht der Fall wäre, wenn nur ein Elektron emittiert würde.

Diese wenigen Beispiele mögen genügen, um die Bedeutung der Erhaltungsgesetze auch für die moderne Physik aufzuzeigen. Das weitaus umfassendste Erhaltungsprinzip, das sowohl in der Makro- als auch in der Mikrophysik und in den gesamten Naturwissenschaften gilt, ist der Satz von der Erhaltung der Energie.

Als WILHELM OSTWALD um die Jahrhundertwende die Energie als das einzig „physikalisch reelle“ bezeichnete, war er gar nicht so weit

von der Wahrheit entfernt, wie man zunächst glaubte. Alles, was wir in der Physik messen und beobachten, ist letztlich Energie. Unsere Kenntnisse über die Atome beruhen allein auf Energieumwandlungen, die sich in ihnen abspielen und als deren Folge Energie, sei es in Form von Photonen oder Korpuskeln für uns meßbar ist. Dadurch sind für den Physiker von heute nur die Energiezustände eines Atoms Realitäten. Irgendwelche Vorstellungen über Einzelheiten des Baus der Atome, über die Elektronenbahnen in der Elektronenhülle, die Anordnung der Kernbausteine im Atomkern sind Modellbilder, die uns die Erscheinungen erklären und neue Aussagen über das Verhalten erlauben, aber sie sind nur solange gültig, solange sie nicht zu den energetischen Realitäten und dem Satz von der Erhaltung der Energie im Widerspruch stehen.

Jede neue Theorie über irgend einen Vorgang, jede neue Modellvorstellung wird zunächst danach beurteilt, ob in ihr die Erhaltungssätze und vor allem der Satz von der Erhaltung der Energie gelten.

WALTHER GERLACH sagte einmal: „Das Gesetz von der Erhaltung der Energie spielt in der Naturwissenschaft und Technik die Rolle der obersten Polizeibehörde: es entscheidet, ob ein Gedankengang erlaubt oder von vornherein verboten ist (10).“

Die moderne Physik, vor allem die Relativitäts- und die Quantentheorie brachten nicht wie so häufig gesagt wird einen „Umsturz des physikalischen Weltbildes“, sondern eine Erweiterung desselben in bis dahin unbekannte Bereiche hinein. Es war verwegen, anzunehmen, daß alle Gesetze, die vorher nur im makrophysikalischen Bereich erprobt waren, auch in der Mikrophysik gültig seien. Daß die Erhaltungsgesetze und vor allem der Energieerhaltungssatz, wenn auch mit einem erweiterten Energiebegriff, allgemeine Gültigkeit besitzen, war von vornherein nicht anzunehmen. Nachdem sie sich jedoch auch im atomaren und relativistischen Bereich bewährt haben, ist man geneigt, sie als die einzigen unveränderlichen Grundprinzipien der Naturwissenschaft anzusehen.

Sicher werden die Erhaltungssätze im Laufe der weiteren Entwicklung der Forschung noch mancher Wandlung unterworfen sein. Vielleicht werden im Rahmen einer umfassenden Feldtheorie die Sätze von der Erhaltung der Ladung und anderer Teilcheneigenschaften in einem noch allgemeineren Satz von der Erhaltung der Energie integriert werden, so wie durch die Relativitätstheorie der Satz von der Erhaltung der Materie im Energieerhaltungssatz aufging.

Vielleicht lassen sich einmal die beiden Sätze von der Erhaltung der Energie und der Erhaltung des Impulses in einem übergeordneten Erhaltungssatz zusammenfassen. Ansätze dazu sind in der Relativitätstheorie vorhanden.

Vielleicht tritt in einem bisher unbekannten Bereich der Physik eine umfassendere Erhaltungsgröße einmal das Erbe der Energie an.

Sicher ist, daß in dem Bereich der Physik, den wir heute überschauen, der Energieerhaltungssatz allgemeine Gültigkeit besitzt und sicher werden Erhaltungsgesetze – wie auch die Erhaltungsgrößen dann aussehen mögen – auch in der Zukunft eine grundlegende Bedeutung für die Physik und die Naturwissenschaft haben.

Quellen-Verzeichnis

1. STRUNZ, E.: Naturbetrachtung und Naturerkenntnis im Altertum. Hamburg und Leipzig 1904.
2. DIELS, H.: Fragmente der Vorsokratiker, 1, Berlin 1903.
3. –: Fragmente der Vorsokratiker, 2, Berlin 1907.
4. –: Fragmente der Vorsokratiker, 17, Berlin.
5. MAYER, J. R.: Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. Liebigs Annalen der Chemie u. Pharmazie, 42, 233, 1842. S. Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr. 180. Leipzig 1911.
6. –: Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel. Heilbronn, Drechsler'sche Buchhandlung 1845, s. a. Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr. 180. Leipzig 1911.
7. PLANCK, M.: Das Prinzip der Erhaltung der Energie. B. C. Teubner. Leipzig 1887.
8. WEIZSÄCKER, C. F. v.: Die Auswirkung des Satzes von der Erhaltung der Energie in der Physik in: J. R. MAYER und das Energieprinzip. Gedenkschrift VDI-Verlag. Berlin 1942.
9. MAYER, J. R.: Beiträge zur Dynamik des Himmels. J. U. Landherr. Heilbronn 1848.
10. GERLACH, W.: JULIUS ROBERT MAYER, Verl. d. D. Phys. Gesellschaft. 3. Reihe, 23. Jahrg. Beilage zu Heft 2, 1942, oder Humanität und naturwissenschaftliche Forschung (Die Wissenschaft, Band 118). Braunschweig 1962.